

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 534.232

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) _____
(код і назва спеціальності)

на тему: _____

Виконав (-ла): студент (-ка) _____ курсу, групи _____
(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018

Завдання на магістерську дисертацію

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут (факультет) факультет електроніки

Кафедра акустики та акустoeлектроніки

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Дідковський В.С.
(підпис)

«___» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Кизимі Дмитру Володимировичу

1. Тема дисертації «Порівняльні дослідження характеристик низькочастотних п'єзокерамічних перетворювачів», керівник дисертації професор Лейко Олександр Григорович, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2018р. № _____.

2. Термін подання студентом дисертації: 9.12.2018 р.

3. Об'єкт дослідження: 4 типи п'єзокерамічних перетворювачів

4. Вихідні дані: п'єзокерамічні перетворювачі: повздовжньо – згинний, циліндричний вільно обтічний, пластинчастий зі згинними дисками і стержньовий.

$f_p = 600 \text{ Гц}$ - резонансна частота

5. Перелік завдань:

провести теоретичний аналіз різних типів перетворювачів

перевірити, чи можна забезпечити задоволення таких параметрів, як:

$H \approx 300 \text{ м}$ - глибина занурення

$\Delta f = 200 \text{ Гц}$ - смуга пропускання частот

$\eta_{ea} \approx 50\%$ - ККД

Нерівномірність ХН - ± 2 дБ

порівняти результати розрахунків для кераміки ЦТБС-3

6. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): Презентація в середовищі MS Powerpoint

7. Дата видачі завдання: _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір та вивчення джерел інформації для написання дипломної роботи; складання бібліографії наукових джерел	13-27.09.2018	
2	Складання плану дипломної роботи	28.09-06.10.2018	
3	Підготовка та написання першого розділу	07-20.10.2018	
4	Підготовка та написання другого розділу	21.10-26.10.2018	
5	Підготовка та написання третього розділу	26-07.11.2018	
6	Підготовка та написання четвертого розділу	07-14.11.2018	
7	Написання анотації, вступу, розділу стартапу та висновків	15-30.11.2018	
8	Виправлення зауважень	16-22.05.2018	
9	Оформлення дипломної роботи	02.12-7.12.2018	
10	Здача оформленої роботи на кафедрі	10.12.2018	
11	Захист дипломної роботи	19.12.2018	

Студент

(підпис)

Кизима Д. В.

Керівник роботи

(підпис)

Лейко О. Г.

Анотація

В магістерській дисертації були розглянуті чотири типи п'єзокерамічних низькочастотних перетворювачів: повздовжньо – згинний, циліндричний з вільно обтічними кільцями, пластинчастий зі згинними дисками і стержньовий грибоподібний, проведений теоретичний аналіз їх електричних та гідроакустичних характеристик.

Перетворювачі досліджені в умовах максимально можливого їх акустичного навантаження з урахуванням практичної можливості реалізації таких умов.

Також в кінці магістерської роботи наведені висновки і порівняльна таблиця п'єзокерамічних перетворювачів з різними типами п'єзокераміки.

Дипломна робота містить такі розділи:

- Аналіз вимог ТЗ до низькочастотних перетворювачів;
- Вибір підходів в забезпеченні порівняльної оцінки низькочастотних перетворювачів різних типів;
- Теоретичний аналіз низькочастотних перетворювачів;
- Порівняльна оцінка результатів виконаних розрахунків двох типів п'єзокерамік PZT-4 та ЦТБС-3.

Робота містить 19 таблиць, 10 рисунків та 31 літературне джерело.

Ключові слова: ГАП, п'єзокерамічні перетворювачі, гідроакустичні характеристики, метод еквівалентних електромеханічних схем.

Summary

In the master's of dissertation viewed four types of piezoelectric low-frequency transducers as: longitudinally - flexural, cylindrical with streamlined rings, lamellar with bending disks, and rod mushroom - shaped, theoretical analyzed of their electrical and hydroacoustic characteristics.

The transducers investigated under conditions of the maximum possible acoustic load, taking into account the practical feasibility of such conditions.

Also at the end of the master's dissertation are the findings and a comparative table of piezoelectric transducers with different types of piezoceramics.

Work contains the following sections:

- analysis of the requirements of specification to low-frequency transducers;
- the choice of approaches in providing a comparative assessment of low-frequency transducers of various types;
- theoretical analysis of low-frequency transducers;
- comparative evaluation of the results of the calculations of two types of piezoceramic transducers as: PZT-4 and CTBS-3.

The work contains 19 tables, 10 figures and 31 literary sources.

Keywords: GAP, piezoceramic transducers, hydroacoustic characteristics, method of equivalent electromechanical schemes.

Зміст

Вступ	7
1. Аналіз вимог ТЗ до низькочастотних перетворювачів	7
2. Вибір підходів в забезпеченні порівняльної оцінки низькочастотних перетворювачів різних типів	10
2.1. Про узгодження з робочим середовищем.....	10
2.2. Еквівалентна електромеханічна схема перетворювачів, що порівнюються	14
3. Теоретичний аналіз низькочастотних перетворювачів	24
3.1. Аналіз розрахунків перетворювачів на основі зарубіжної п'єзокераміки типу PZT-4.....	24
3.2. Повздожньо-згинний перетворювач.	27
3.3. Циліндричний вільно обтічний перетворювач	43
3.4. Пластинчастий перетворювач зі згинними дисками	56
3.5. Стержньовий грибоподібний перетворювач.....	68
4. Порівняльна оцінка результатів виконаних розрахунків з розрахунками для п'єзокераміки складу ЦТБС-3.....	77
Стартап-проект.....	83
Висновок	87
Література.....	89

Вступ

1. Аналіз вимог ТЗ до низькочастотних перетворювачів

У відповідності з технічним завданням аналізу підлягають чотири типи перетворювачів: повздовжньо – згинний, циліндричний вільно обтічний, пластинчастий зі згинними дисками і стержньовий з резонансною частотою у воді $f_p = 600 \text{ Гц}$. Відносно стержньового низькочастотного перетворювача варто відразу сказати, що задане значення f_p для такого типу перетворювача досить низьке і нам не відомо, чи були на практиці досліджені перетворювачі такого типу з такою низькою резонансною частотою. Виходячи з таких міркувань, можна відмітити, що, в цілому, створення низькочастотних перетворювачів для $f_p = 600 \text{ Гц}$ - задача нетрадиційна і, хоч і шляхи її вирішення відомі, при реалізації на практиці можливі складнощі, які бажано передбачити і оцінити в процесі теоретичних досліджень. З цією ціллю, в дипломній роботі, згідно з ТЗ, будуть викладені результати аналізу обмежень, які виникають пов'язані з різними фізичними факторами, включаючи властивості п'єзокераміки, яка використовується, на можливість реалізації потенційних технічних параметрів перетворювачів, таких як: відносна потужність, яка характеризується заданим відношенням випромінюючої потужності W_a і маси m $\left(\frac{W_a}{m} \geq 25 \text{ Вт/кг} \right)$, робочою глибиною H ($H \approx 300 \text{ м}$), ефективною смугою пропускання частот Δf ($\Delta f = 200 \text{ Гц}$), електроакустичним ККД - η_{ea} ($\eta_{ea} \approx 50\%$) і характеристикою направленості у всі сторони з нерівномірністю ± 2 дБ. При цьому перетворювачі всіх чотирьох типів мають бути виготовлені на основі п'єзокераміки зарубіжного складу, вибраного з урахуванням можливостей оптимального забезпечення електричної, механічної і теплової міцності перетворювачів. Таким складом являється п'єзокераміка PZT-4.

Однак слід також розуміти, що правильний вибір складу кераміки не гарантує виконання всіх, перелічених вище, вимог. Так, можливість одночасного виконання вимог по параметрам W_a/m і Δf досить проблематична, особливо для циліндричних вільно обтічних перетворювачів, хоча для нього майже відсутні вимоги щодо робочої глибини, внаслідок додаткового армування під дією гідростатичного тиску. В пластинчастому перетворювачі, можливість забезпечити вимоги до параметрів W_a/m і η_{ea} виключена ще на самому початку, при використанні коливальної системи зі згинними дисками (відповідно до вимог ТЗ), оскільки поперечний п'єзоефект характерний для дисків, менш ефективний при перетворенні енергії, ніж повздовжній, який використовується в інших перетворювачах, а малі хвильові розміри перетворювача (діаметр $D \leq 0,2\lambda$, де λ - довжина хвилі у воді) і глибокий розподіл коливальної швидкості по випромінюючій поверхні не дозволяють забезпечити ефективне випромінювання у воду через недостатню узгодженість перетворювача з робочим середовищем. Але для такого типу перетворювача без проблем забезпечуються вимоги щодо все направленості з малою нерівномірністю (перетворювач малих хвильових розмірів), в той час як, наприклад, для вільно обтічного перетворювача, характеристика направленості в повздовжній (осьовій) площині є однозначною функцією його хвильової висоти H , тобто майже повністю визначається значенням частоти f_p .

Відносно стержньового перетворювача необхідно відразу вказати, що вимоги високої енергетичної віддачі на низькій частоті для нього альтернативні. Оскільки габарити, а відповідно, і маса цього перетворювача зростають в кубічній залежності по мірі зниження його резонансної частоти, сама можливість виготовлення такого перетворювача з $f_p = 600 \text{ Гц}$ досить проблематична. Шляхи її вирішення необхідно шукати в створенні асиметричної коливальної системи з легкою випромінюючою і масивною

тильною накладками, які б кріпились з обох боків п'єзокерамічного пакету. Наслідком такої структури побудови коливальної системи – яскраво виражений переважаючий потік акустичної енергії з поверхні випромінюючої накладки.

З приведених вище зауважень стає зрозуміло, що виконання всіх вимог технічного завдання в комплексі, всіма чотирма типами низькочастотних перетворювачів – неможливе. Звісно, ступінь наближення у кожного типу перетворювача різна, тому задача полягає в тому, щоб, використовуючи весь арсенал сучасних технологічних рішень, в повній мірі, на скільки це можливо, за рахунок компромісного підходу задовольнити поставлені в ТЗ вимоги.

Зрозуміло, що енергетичні і експлуатаційні можливості перетворювачів, поряд з використаними в них технічними рішеннями, в значній мірі визначаються властивостями активного матеріалу – в даному випадку п'єзокерамікою PZT-4, фізичні параметри якого значно відрізняються від характеристик вітчизняного складу ЦТБС-3. При теоретичному аналізі перетворювачів, оцінка їх параметрів має бути проведена з розрахунком на ті ж самі технічні рішення, які використовувались раніше. Для отримання найбільшої енергетичної віддачі від кожного типу перетворювача, вони мають бути проаналізовані в умовах, які б забезпечували найкраще узгодження з робочим середовищем. На цій підставі, порівняльна оцінка результатів розрахунку параметрів, представлена в дипломній роботі, має виявити різницю у властивостях перетворювачів, які зумовлені тільки використанням різних п'єзокерамічних складів, і послужити підставами для формулювання технічних вимог до властивостей п'єзокераміки, для виготовлення в Україні.

2. Вибір підходів в забезпеченні порівняльної оцінки низькочастотних перетворювачів різних типів

2.1. Про узгодження з робочим середовищем

Характерною особливістю перетворювачів таких типів, як поздовжньо-згинні, циліндричні вільно обтічні та пластинчасті є зменшені хвильові розміри (приблизно до $0,3 \lambda$ на частоті резонансу). Саме завдяки цьому вони придатні для використання на частотах нижче 1000 Гц. У перетворювача стержньового типу хвильовий розмір випромінюючої накладки не є резонансним, тому в даному випадку принципово можливо зменшити його з величини $0,5 \lambda$, зазвичай характерної для випадків використання його в багатoelementних акустичних антенах, які мають низький рівень випромінювання енергії в бокових напрямках, до $0,3 \lambda$ і менше, щоб отримати зменшені значення масо габаритних параметрів.

Зменшення хвильового діаметру D в вільно обтічних циліндричних перетворювачах до значень $D = (0,3 - 0,4) \lambda$ з величини $D = 0,8 \lambda$, яка характерна для циліндричних перетворювачів з повітряною порожниною, використовуваних на нульовій моді пульсуючих коливань кільця з п'єзокераміки ЦТБС-3, здійснюється за рахунок реактивної складової імпедансу внутрішньої заповненої водою порожнини перетворювача.

Ще менші резонансні розміри мають поздовжньо-згинні перетворювачі еліптичної форми з розмірами малої і великої осі до 0,1 та $0,3 \lambda$ відповідно, який трансформує поздовжні коливання п'єзокерамічного пакету в згинні коливання пружної оболонки з неактивного матеріалу (найчастіше з металу), і пластинчастий перетворювач з згинними дисками, резонансний діаметр біморфних пластини якого не перевищує $0,2 \lambda$. Враховуючи, що на резонансній частоті $f_p = 600 \text{ Гц}$ довжина хвилі, виражена в абсолютних одиницях довжини, настільки велика, що виготовлення перетворювачів навіть зменшених хвильових розмірів зіштовхується з виробничими складнощами, вибір технічних рішень з побудови

перетворювачів має бути орієнтований на конструкції у вигляді набору резонансних елементів, наприклад, модулів для повздовжньо-згинного перетворювача, кілець для циліндричного перетворювача, що представляють собою тіла різної форми з хвильовими розмірами, які відрізняються один від одного.

Виходячи з такого уявлення, логічним буде наступне питання, при яких умовах слід проводити порівняння перетворювачів, щоб забезпечити його коректність. Вирішення даного питання можливе при використанні двох підходів. Перший підхід полягає в створенні класичних умов адекватності порівняння параметрів однотипних джерел. В якості таких умов приймаються умови описання роботи перетворювачів на основі єдиної моделі – еквівалентної електромеханічної схеми та повного узгодження навантажень з акустичної та електричної сторони у всьому діапазоні робочих частот.

При такому підході повністю використовуються потенційні можливості перетворювачів по полосі пропускання і досягається висока ступінь перетворення потужності та висока ефективність перетворювача по всій смузі частот при заданих електрофізичних параметрах п'єзокераміки. Недолік такого підходу – неможливість реалізації максимального значення випромінюючої потужності, яке може бути досягнуте, якщо обрати вузьку резонансну область. Узгодження з боку електричної сторони навантажень генератора та джерела для досягнення граничної смуги робочих частот не завжди є необхідним. Другий підхід заснований на тому, що для забезпечення максимальної випромінюючої потужності в вузькій смузі частот достатньо узгодити навантаження генератора та перетворювача на резонансній частоті чи близько до неї.

Виходячи з цього підходу, в якості єдиних умов для забезпечення коректного порівняння параметрів, розглянутих низькочастотних перетворювачів різних типів в дослідженні було прийнято:

- єдина еквівалентна схема для всіх типів перетворювачів;

- узгодження навантажень перетворювачів з електричної сторони на резонансній частоті ;
- умови максимально можливого акустичного навантаження перетворювачів.

В якості критерія достатності акустичного узгодження з середовищем одиничних перетворювачів, прийнято забезпечення рівня акустичної потужності, у відповідності до відношення W_a / m . Звісно, такий критерій може застосовуватись лише до потужних перетворювачів до яких не можна віднести пластинчастий перетворювач зі згинними дисками. Щоб краще узгодити його з середовищем, випромінююча поверхня перетворювача створюється таких великих розмірів, які можливо реалізувати в умовах виробництва. Як буде показано далі, на резонансній частоті $f_p = 600 \text{ Гц}$ при хвильових розмірах циліндричного перетворювача $0,3 \lambda$ та висоті повздовжньо-згинного випромінювача не більше $0,5 \lambda$ узгодження з акустичним середовищем є достатнім. Однак для одиничного стержньового перетворювача з розмірами випромінюючої накладки, не перевищуючим $0,3 \lambda$, умови навантаження виявляються недостатніми. Для збільшення безрозмірного коефіцієнту α при активній складовій імпедансу випромінювача $Z = (\rho c) S_{\text{випр}} (\alpha + j\beta)$, де (ρc) - хвильовий опір середовища, $S_{\text{випр}}$ - площа випромінюючої поверхні перетворювача, стержньовий перетворювач буде розглянутий у складі антенної решітки великих хвильових розмірів без акустичних щілин. В ній перетворювачі за рахунок акустичного навантаження один на одного будуть повністю узгоджені з середовищем. Звісно, таке виключення для стержньового перетворювача ставить його в особливе положення в порівнянні з іншими, але, як було сказано раніше (розділ 1.1.) – це положення він займав спочатку. Розгляд одиничного стержньового перетворювача з розмірами накладки $0,3 \lambda$ не має сенсу, через неможливість задовольнити вимоги відносної потужності W_a / m .

Таким чином, навіть при забезпеченні задовільних умов навантаження перетворювачів, конкретні значення коефіцієнтів α і β будуть відрізнятись для перетворювачів різних типів, що зумовлене специфікою збудження звукового поля в оточуючому середовищі конкретним типом перетворювача.

2.2. Еквівалентна електромеханічна схема перетворювачів, що порівнюються

Для виконання теоретичного аналізу роботи акустичного п'єзокерамічного перетворювача в робочому середовищі (воді) необхідно знайти вирішення задачі вимушених коливань перетворювача, яке задовольняє граничні умови при сталих гармонічних коливаннях. Вирішення крайових задач електропружності базується на основних гіпотезах і методиках побудови моделей в механіці суцільного середовища і класичній електродинаміці. У зв'язку з цим в електропружності можуть бути ефективно використані загальні математичні методи вирішення граничних задач математичної фізики. Однак для інженерних цілей вирішення системи рівнянь електропружності, яка включає в себе, в загальному випадку, рівняння стану, рівняння Максвела для п'єзокерамічного середовища, рівняння руху коливальної системи перетворювача та співвідношення Коші, будуть надто громіздким, а результати чисельного розрахунку вихідних параметрів – малопереконливими, враховуючи складнощі при їх фізичному трактуванні, особливо для складних коливальних систем, які характеризуються кількістю геометричних і фізичних параметрів.

Найбільш прийнятним для розуміння та наочності, для представлення в інженерній практиці – використання еквівалентних електромеханічних схем, по яким за методиками теорії електричних кіл, відносно просто та наочно можна визначити електроакустичні характеристики перетворювача конкретного типу. Зокрема, для розрахунку параметрів усіх найбільш широко використовуваних типів сучасних перетворювачів (циліндричні, сферичні, пластинчасті, стержньові) використовуються еквівалентні схеми з зосередженими параметрами.

Зазвичай перетворювач представляють у вигляді шести полюсника, а запис граничних умов зі сторони пари електричних та двох пар механічних клем відображають його специфіку. Методологія переходу від механічних коливальних систем до еквівалентних електромеханічних схем з

зосередженими параметрами, заснована на спільному вирішенні рівнянь стану п'єзокерамічного середовища та рівнянь руху, записаних у формі Ньютона, була розроблена в СРСР Гутіним Л.Я. та Харкевичем А.А., а в США – У.Мезоном. Володіючи деякою універсальністю, методи вирішення в геометричних координатах прямої задачі (розрахунок вихідних характеристик перетворювачів при заданих впливах на вході) не забезпечують фізичної наочності при вирішенні зворотної задачі (оптимізація параметрів ефективності перетворювачів з урахуванням умов їх узгодження з електричної та акустичної сторони). Зазвичай для оптимізації параметрів перетворювачів розглядають варіанти прямого розрахунку; це не забезпечує розвиток інженерного підходу до проектування, що необхідно, враховуючи що вихідні дані можуть бути неточними або навіть неповними.

Явною перевагою в цьому аспекті володіє енергетичний підхід, який дозволяє вирішити пряму задачу в узагальнених координатах. При реалізації енергетичного підходу рівняння руху елементів коливальної системи записують у формі рівнянь Лагранжа другого порядку. В результаті вирішення кожної задачі виявляються фізичні закономірності, значення яких спрощує інтерпретацію результатів розрахунку вихідних параметрів і проектування перетворювача під задані параметри. Переваги енергетичного підходу особливо переконливі при аналізі складних електромеханічних систем, наприклад, з двох вимірною конфігурацією або систем, які містять в своїй структурі не п'єзокерамічні елементи, які коливаються на власній моді. Методологія використання цього методу для аналізу циліндричних, пластинчастих та стержньових перетворювачів розроблена Б.С. Ароновим [1]. Досвід використання енергетичного методу показує, що він дозволяє достатньо просто і в наочній формі вирішувати також зворотні задачі теорії акустичних перетворювачів, зокрема, задачі оптимального використання п'єзокераміки при збудженні коливань пружних тіл. Широка універсальність, наочність та достатній рівень освоєння енергетичного методу визначили вибір саме його при побудові еквівалентних електромеханічних схем для всіх

чотирьох перетворювачів, які підлягають порівняльному аналізу, згідно з технічним завданням.

В основі енергетичного методу лежить припущення, що для точного опису роботи коливальної системи необхідна рівність енергій, якими володіють зосереджені параметри еквівалентної схеми і реальний розподіл параметрів перетворювача [2]. Складові, які входять в рівняння балансу повної енергії виражають через узагальнені координати – зміщення центру приведення V_0 , розташованого на випромінюючій поверхні і електричної напруги U на виході перетворювача, а також еквівалентні параметри – масу m_e і гнучкість C_e . Електричну і механічну сторони схеми – зв'язують ідеальним трансформатором з коефіцієнтом електромеханічної трансформації n_g , а з електричної сторони до кола підключають ємність загальмованого перетворювача C_0^S . Втрати енергії враховують за допомогою складових опору електричних втрат $r_{ел.втр}$ і механічних втрат $r_{мех.втр}$, приведених відповідно до напруги U та коливальної швидкості V_0 . Значення опору втрат $r_{ел.втр}$ і $r_{мех.втр}$ прийнято розраховувати, виходячи з експериментальних даних. Опір електричних втрат, який враховує діелектричні втрати в п'єзокерамічних елементах коливальної системи перетворювача, безпосередньо залежить від тангенсу кута діелектричних втрат в п'єзокераміці $tg\delta$ і електричної ємності вільного перетворювача C_0^T . Діелектричні втрати в області низьких частот мають гістерезисний характер і $tg\delta$ не залежать від частоти, тому можна використовувати $tg\delta$ на частоті f , яка значно нижча ніж частота резонансу f_p , для розрахунку $r_{ел.втр}$ на основному резонансі. Прийнято вважати, що діелектричні втрати в п'єзокераміці не пов'язані з деформаціями. Електрична ємність C_0^T відповідає ємності, виміряній на частоті f .

Опір механічних втрат, який враховує механічні втрати не тільки в п'єзокераміці, а й в елементах конструкції перетворювача, прийнято визначати

за співвідношеннями з еквівалентної схеми ненавантаженого перетворювача, виходячи з експериментально встановленої добротності $Q_{m,n}$ для перетворювача в повітрі. Оскільки механічні втрати в п'єзокерамічному перетворювачі зумовлені внутрішнім в'язко пружним тертям в кераміці і в пасивних матеріалах, вони в загальному випадку залежать від частоти. Але, оскільки перетворювач розглядається на основному резонансі і в порівняно вузькій смузі частот, можна вважати, що опір не залежить від частоти.

Потік акустичної енергії можна представити у вигляді виразу, який включає в себе комплексний опір випромінювання Z_s . Таку еквівалентну схему (рис.1) зручно використовувати як достатньо точне явлення перетворювача поблизу резонансної частоти основної моди і нижче її, оскільки при зниженні частоти, форма коливань, порівнюваних перетворювачів різних типів – не зміниться.

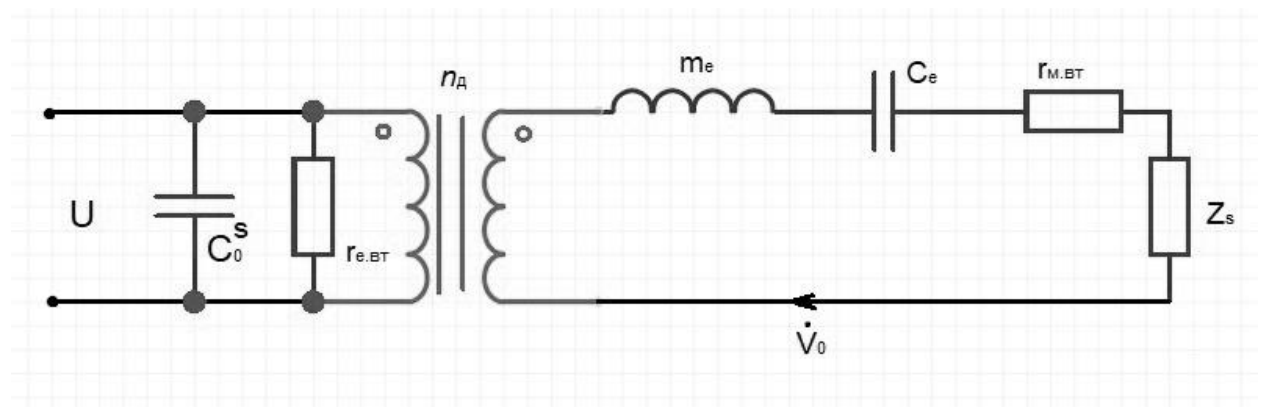


Рис. 1. Еквівалентна електромеханічна схема навантаженого п'єзокерамічного перетворювача

Особливості використання схеми, представлені на рис.1. при розрахунку параметрів перетворювачів різних типів розглядаються в відповідних розділах дипломної роботи. Зручність використання даної схеми полягає в можливості теоретичного аналізу перетворювачів на основі її параметрів, які мають однаковий сенс для всіх типів перетворювачів, що розраховується за різними формулами, враховуючи специфіку кожного типу перетворювача. Нижче приведена таблиця формул, для розрахунку

параметрів еквівалентних схем кожного типу перетворювача і наведені пояснення відносно прийнятих значень, які не були вказані раніше.

Таблиця 1

Парам.	Формули для розрахунку параметрів еквівалентної схеми	
m_e	Повздожньо-згинний перетворювач	$m_e = \frac{1}{2} \beta_m \rho_{об} h_{об} \widehat{S} t,$ де $\beta_m = A_1^2 \left[\left(A_2^2 + 1 + \frac{\varphi_0^2}{3} \right) - 2 A_2 \left(2 \frac{\sin \varphi_0}{\varphi_0} - \cos \varphi_0 \right) \right],$ $A_1 = (\sin \varphi_0 - \varphi_0 \cos \varphi_0)^{-1};$ $A_2 = \cos \varphi_0 + \varphi_0 \sin \varphi_0;$ φ_0 - половина кута розкриву оболонки; $\rho_{об}, h_{об}, \widehat{S}, t$ - відповідно густина матеріалу, товщина, довжина дуги арочної частини і ширина оболонки
	Кільцевий вільно – обтічний перетворювач	$m_e = 2 \rho_k \pi r_{сер} H d,$ де ρ_k - густина п'єзокераміки $r_{сер}, H, d$ - відповідно середній радіус, висота і товщина кільця
	Пластинчастий зі згинними дисками	$m_e = 2 \cdot 0,3 M,$ де $M = \rho_m V_m + \rho_{np} V,$ $\rho_m V_m$ - відповідно густина і об'єм металічного шару біморфної пластини; $\rho_{np} = \rho_k \left[1 - \gamma \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_k} \right) \right],$ γ - відносний об'єм металу неоднорідного шару біморфної пластини

	Стержньовий грибоподібний перетворювач	$m_e = \frac{\rho_1 l_1 S_1}{2} + \frac{\rho_2 l_2 S_2}{2} \frac{\cos^2 k_1 l_1}{\sin^2 k_2 l_2'} + \frac{\rho_3 l_3 S_3}{2} \frac{\sin^2 k_2 l_2'' \cos^2 k_1 l_1}{\cos^2 k_3 l_3 \sin^2 k_2 l_2'}$, де ρ, l, S - відповідно густина, довжина і площа поперечного перерізу коливальної системи; k - хвильовий опір на частоті ω_0 : $k = \omega_0 / c$; c - швидкість звуку; Індекси 1, 2, 3 відносяться відповідно до випромінюючої накладки, п'єзокерамічного пакету і до тильної накладки $l_2' = \left[\operatorname{arccctg} \left(\frac{Z_1}{Z_2} \operatorname{tg} k_1 l_1 \right) \right] / k_2$, $Z = \rho c S$; $l_2'' = l_2 - l_2'$
Еквівалентна гнучкість C_e	Повздожньо-згинний перетворювач	$C_e = \frac{C_{об} C_k}{C_{об} + C_k}$, де $C_{об} = 2 \frac{6 R_0^3 (\sin \varphi_0 - \varphi_0 \cos \varphi_0)^2}{E_{об} t h_{об}^3 \varphi_0}$, R_0 - радіус дуги оболонки; $E_{об}$ - модуль Юнга матеріалу оболонки; $C_k = \left[\frac{1}{2} \omega_0 (\rho c S)_k \operatorname{ctg} \frac{k_k l}{2} \right]^{-1}$, ω_0 - частота резонансу в повітрі; $(\rho c S)_k$ - механічний опір п'єзокераміки; k_k - хвильове число для п'єзокераміки на частоті ω_0
	Кільцевий вільно – обтічний перетворювач	$C_e = \frac{r_{cp}}{2 \pi E_{33}^E H d}$, де E_{33}^E - модуль Юнга п'єзокераміки при повздожніх коливаннях в постійному електричному полі

	Пластиначастий зі згинними дисками	$C_e = 0,5 \frac{a^2}{23D},$ <p>де a - радіус біморфної пластини; $D = \frac{1}{3(1-\nu^2)} \left\{ E_{np} \left[Z_0^3 - (Z_0 - t_{\kappa})^3 \right] + E_m \left[(Z_0 - t_{\kappa})^3 - (Z_0 - t_{\kappa} - t_m)^3 \right] \right\};$ ν - коефіцієнт Пуассона п'єзокераміки; $E_{np} = E_{31}^E \left[1 - \gamma \left(1 - \frac{E_{31}^E}{E_m} \right) \right]^{-1},$ E_{31}^E - модуль Юнга п'єзокераміки при поперечних коливаннях в постійному електричному полі; E_m - модуль Юнга металу; $Z_0 = \frac{E_{np} t_{\kappa}^2 + E_m t_m (2t_{\kappa} + t_m)}{2(E_{np} t_{\kappa} + E_m t_m)},$ t_{κ}, t_m - товщина п'єзокерамічного диску і металічного шару біморфної пластини, відповідно</p>
	Стержньовий грибоподібний перетворювач	$C_e = \left\{ 2\pi^3 \left[\frac{E_1 S_1}{l_1} \left(\frac{l_1}{\lambda_1} \right)^3 + \frac{E_2 S_2}{l_2} \left(\frac{l_2}{\lambda_2} \right)^2 \cdot \frac{\cos^2 k_1 l_1}{\sin^2 k_2 l_2} + \frac{E_3 S_3}{l_3} \left(\frac{l_3}{\lambda_3} \right)^3 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\sin^2 k_2 l_2 \cos^2 k_1 l_1}{\cos^2 k_3 l_3 \sin^2 k_2 l_2} \right] \right\}^{-1},$ <p>де E - модуль Юнга $E_2 = E_{33}^E$; λ - довжина хвилі в матеріалі</p>
	Повздовжньо-згинний перетворювач	$C_0^S = C_0^T (1 - k_{\partial}^2),$ <p>де $C_0^T = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_k}{\Delta} N,$ $\varepsilon \varepsilon_0$ - діелектрична проникність п'єзокераміки; Δ - відстань між електродами п'єзоелементу; N - кількість п'єзоелементів у пакеті; k_{∂} - динамічний коефіцієнт електромеханічного зв'язку (експериментальний)</p>

Електр ична ємність загаль мовано го перетв орювач а (дефор мація $S=0$) C_0^S	Кільцевий вільно – обтічний перетворю вач	$C_0^S = C_0^T (1 - k_d^2),$ де $C_0^T = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 dH}{\Delta} N,$ $\Delta = \frac{2\pi r_{сер}}{N},$ N - кількість призм в кільці; k - статичний коефіцієнт електромеханічного зв'язку при повздовжньому п'єзоєфекті (експериментальне значення)
	Пластинча стий зі згинними дисками	$C_0^S = C_0^T (1 - k_d^2),$ де $C_0^T = 2 \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_{el}}{t_k} N,$ N - кількість п'єзокерамічних дисків в біморфній пластині
	Стержньов ий грибоподіб ний перетворю вач	$C_0^S = C_0^T (1 - k_d^2),$ де $C_0^T = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_k}{\Delta} N,$ S_k - площа електроду п'єзоелементу; Δ - відстань між електродами п'єзоелементу; N - кількість п'єзоелементів в пакеті; $k_d^2 = \left[1 + \pi^2 (1 - k^2) / 8k^2 \right]^{-1}$
Опір електр ичних втрат $r_{ел.втр}$	Всі типи перетворю вачів	$r_{ел.втр} = (\omega_p C_0^T \operatorname{tg} \delta)^{-1},$ де ω_p - частота резонансу у воді; $\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат в п'єзокераміці
	Повздовжн ьо-згинний перетворю вач	$n_d = \omega_0 k_d (m_e C_0^S)^{\frac{1}{2}},$ де $\omega_0 = (2\pi)^{-1} (m_e C_e)^{-\frac{1}{2}}$

Динамічний коефіцієнт електро механічної трансформації n_o	Кільцевий вільно – обтічний перетворювач	$n_o = n = 2\pi E_{33}^E d_{33} H \frac{d}{\Delta}$, де n - статичний коефіцієнт електромеханічної трансформації; d_{33} - повздовжній п'єзомодуль
	Пластинчастий зі згинними дисками	$n_o = 2 \cdot 6,4 d_{31} E_{np} [t_k + 2(Z_0 - t_k)](1 - \gamma)$, де d_{31} - поперечний п'єзомодуль
	Стержньовий грибоподібний перетворювач	$n_o = \frac{1}{2} n \frac{\left[\left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \operatorname{tg}^2 k_1 l_1 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[1 + \frac{Z_3}{Z_2} \operatorname{tg}^2 k_3 l_3 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left\{ \left[1 + \left(\frac{Z_3}{Z_2} \right)^2 \operatorname{tg}^2 k_3 l_3 \right] (1 + \operatorname{tg}^2 k_1 l_1) \right\}^{\frac{1}{2}}}$, де $n = 2 d_{33} E_2 S_2 / \Delta$
Опір механічних втрат $r_{м.втр}$	Всі типи перетворювачів	$r_{м.втр} = \omega_p m_e / Q_{м.втр}$, ω_p - частота резонансу у воді; $Q_{м.втр}$ - добротність перетворювача у повітрі (експериментальне значення)
Імпеданс випромінювання Z_s	Всі типи перетворювачів	$Z_s = r_s + \gamma x_s$, $r_s = \alpha(\rho c) S_{випр}$, $x_s = \beta(\rho c) S_{випр}$, ρc - хвильовий опір води
	Повздовжньо-згинний перетворювач	$S_{випр} = 4\pi R_e^2$, R_e - ефективний радіус еквівалентної пульсуючої сфери $R_e = \left\{ R_0 A_1 [\varphi_0 (1 - \cos 2\varphi_0) + (\sin 2\varphi_0 - 2\varphi_0)] t / 2\pi \right\}^{\frac{1}{2}}$, $\alpha = \frac{(k R_e)^2}{1 + (k R_e)^2}$; $\beta = \frac{k R_e}{1 + (k R_e)^2}$, k - хвильове число для води на частоті ω_p

	Кільцевий вільно – обтічний перетворю вач	$S_{\text{випр}} = 2\pi r_{\text{сер}} H,$ $\alpha = 0,185$ $\beta = 2,1$
	Пластинча стий зі згинними дисками	$S_{\text{випр}} = 2\pi a^2$
	Стержньов ий грибоподіб ний перетворю вач	$S_{\text{випр}}$ - площа випромінюючої поверхні Для перетворювача з нескінченної антенної решітки без акустичних щілин: $\alpha = 1, \quad \beta = 0$

3. Теоретичний аналіз низькочастотних перетворювачів

3.1. Аналіз розрахунків перетворювачів на основі зарубіжної п'єзокераміки типу PZT-4

У відповідності з ТЗ, результати теоретичного аналізу перетворювачів на основі зарубіжної п'єзокераміки типу PZT-4 (США) мають бути порівняні з даними, отриманими для кераміки ЦТБС-3.

Порівняння їх з параметрами кераміки ЦТБС-3 показує, що механічні параметри відрізняються не більше ніж на 10%; наприклад: густина більша на 4%, швидкість звуку C_{33}^E при повздовжньому п'єзоефекті і постійному електричному полі нижче на 9%, коефіцієнт Пуассона вище на 6,6%. Однак механічна добротність п'єзокераміки PZT-4 і її статична міцність при розтягу набагато вище, в 1,5 рази і в 5 раз відповідно. Тим не менше, механічна динамічна усталена міцність армованої п'єзокераміки PZT-4 і ЦТБС-3 відповідно даним мало відрізняються, величина для PZT-4 складає 38 МПа, а для ЦТБС-3 не менше 32 МПа. Порівняння механічних параметрів п'єзокераміки PZT-4 і ЦТБС-3 дає підстави припускати, що перетворювачі з п'єзокераміки зарубіжного складу при однаковій резонансній частоті будуть характеризуватись меншими габаритами і масою, яка прямо пропорційна відносному об'єму п'єзокераміки у складі коливальної системи.

Теоретичний аналіз перетворювачів виконується у відповідності з технологією виробництва. Це означає, що допускається використання матеріалів, конструкторсько – технологічних рішень і технологічних процесів, які застосовують в вітчизняних перетворювачах. Таке припущення дає розуміння, що вплив конструктивно – технологічного оформлення коливальних систем перетворювачів можна врахувати таким же чином, як це було зроблено у відношенні перетворювачів, створених раніше. Тому є підстави вважати, що різниця в результатах вимірювання добротності ненавантаженого перетворювача за рахунок втрат в елементах конструкції з пасивних матеріалів, але ефективна смуга пропускання частот неодмінно буде

більш вузькою при використанні зарубіжної кераміки. Врахування впливу конструктивного оформлення секційної п'єзокераміки, аналогічно вітчизняним конструкціям, потрібно врахувати шляхом зменшення швидкості звуку C_{33}^E на (10-12)% відносно приведених табличних значень. Такий відсоток зумовлений наявністю клейових швів, відповідає встановленому для зарубіжних конструкцій [4].

На жаль, у зв'язку з відсутністю експериментальних даних про усталену міцність п'єзокераміки PZT-4 доведеться рахувати, беручи до уваги, що цей параметр, при базі напрацювання більше 10^9 циклів, посиляючись на [3], можна вважати, що він також буде однаковим для обох типів кераміки і при базі напрацювання 10^{10} циклів.

Порівняння п'єзомодулів обох типів кераміки показує, що у закордонній п'єзокераміці цей параметр значно нижчий (не менше ніж на 10%). Тим не менш, ця різниця не проявляється по відношенні до статичних коефіцієнтів електромеханічного зв'язку, завдяки різниці між діелектричної проникністю складів кераміки: наприклад ϵ_{33}^T у складі PZT-4 приблизно в 1,75 рази нижча ніж у складі ЦТБС-3, а K_{33} лише на 8% вища. Рівень діелектричних втрат в п'єзокераміці PZT-4 приблизно однаковий з керамікою ЦТБС-3.

Таким чином, ефективність електромеханічного перетворення енергії в закордонному складі п'єзокераміки ненабагато вищий, але за рахунок дещо вищої енергоємності, так як за деякими даними електрична міцність закордонних конструкцій перевищує цю величину, слід очікувати, що і рівень випромінюючої потужності W_a , і відносна потужність $\frac{W_a}{m}$ (в основному, за рахунок зменшення маси) будуть більшими при використанні кераміки PZT-4.

Можливість забезпечення більш високих рівнів динамічних напружень в п'єзокераміці PZT-4, зумовлена тим, що характер залежності п'єзомодуля d_{33} від величини армованого навантаження δ_a значно відрізняється від

характерного для ЦТБС-3: при значеннях $\delta_a \geq 700 \cdot 10^5 \text{ Н / м}^2$ п'єзомодуль d_{33} зросте на декілька відсотків [5].

Звісно, зазначені зауваження містять загальний характер і можуть використовуватись для конкретних типів перетворювачів. Вони будуть уточнені, при викладенні результатів теоретичного аналізу.

3.2. Повздожньо-згинний перетворювач.

Повздожньо-згинний перетворювач зменшених хвильових розмірів може бути віднесений до потужних низькочастотних перетворювачів. В ньому потенційно поєднуються енергетичні характеристики і характеристики міцності за рахунок розділення функцій перетворення і випромінення енергії між елементами коливальної системи – джерелом збудження виступає кераміка, а сама пружна оболонка – випромінювачем, яка безпосередньо і контактує з водним середовищем.

Повздожньо-згинний перетворювач має секціоновану пластину з п'єзокерамічних елементів 1 та пружну оболонку 2 у вигляді короткого еліптичного циліндра. Саме такий перетворювач буде досліджуватись, згідно ТЗ.

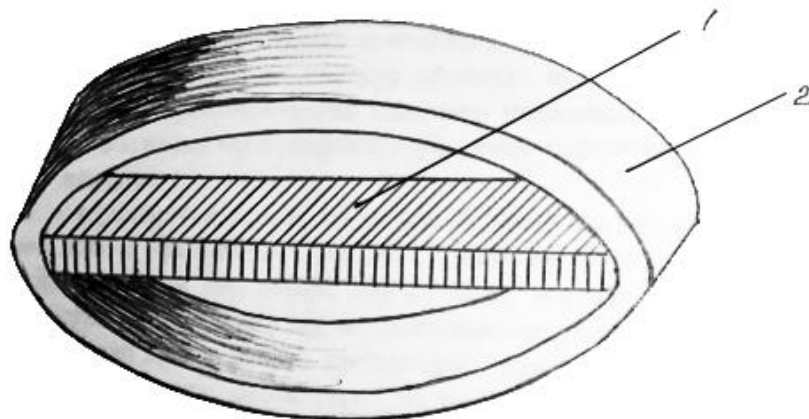


Рис.2. Схематичне зображення коливальної системи повздожньо-згинного перетворювача

Враховуючи, що в звіті представлені перші розгорнуті результати досліджень продольно-згинного перетворювача, зроблені по відкритому ТЗ, нижче детально описані особливості коливальної системи і функціонування цього перетворювача.

П'єзоелементи, з яких формується пластина, в залежності від специфіки конструктивного оформлення перетворювача (армування, герметизація та ін.) можуть мати форму прямокутних пластин, дисків або шайб з електродами, нанесеними на великі плоскі поверхні. Всі п'єзоелементи в стержні – електрично з'єднані паралельно.

При подачі на електроди електричної напруги з частотою, рівною частоті перетворювача, в стержні в наслідок зворотного п'єзоефекту збуджуються коливання. Конфігурація і спосіб з'єднання п'єзоелементів забезпечують повздовжні коливання в стержні, за рахунок реалізацію повздовжнього п'єзомодуля. Форма розподілу коливань в стержні подібна, до форми у на пів хвильового вібро-перетворювача: амплітуда зміщень зростає від нуля в центрі до максимального значення на краях стержня. Поступальний рух торців п'єзокерамічного стержня, на яких закріплена оболонка, трансформується в її згинні коливання таким чином, що максимум амплітуди зміщень спостерігається вздовж малої осі оболонки. Структуру і конфігурацію елементів коливальної системи забезпечують за рахунок механічної трансформації коливань від стержня до оболонки збудження акустичного сигналу у водному середовищі з амплітудою, яка в багато разів перевищує зміщення торців п'єзокерамічного стержня. Специфіка розподілу коливань по контуру оболонки на основній частоті перетворювача характеризується наявністю протифазних ділянок коливань, які розділяються вузловими лініями і знаходяться навколо великої та малої осі цієї оболонки.

При збудженні в перетворювачі більш високих мод коливань, наприклад поблизу повздовжнього резонансу п'єзокерамічного стержня, амплітуда коливань його торців значно зростає, хоча кількість протифазних ділянок на поверхні – збільшиться, а електроакустичний ККД і полоса пропускання відповідно зменшаться, електрична потужність значно перевищує випромінюючи на основній частоту перетворювача. Однак використання повздовжньо-згинної системи доцільне на основній частоті, адже такий перетворювач єдиний серед низькочастотних, який може забезпечувати достатньо ефективне випромінювання на частоті нижче 1000 Гц, при мінімальних масо-габаритних характеристиках.

Особливості геометрії коливальної системи повздовжньо-згинного перетворювача обумовлюють його зменшеними, по відношенню до циліндричних і стержньових перетворювачів, хвильовими розмірами.

Зазвичай розмір перетворювача по більшій осі менший половини довжини хвилі сигналу у воді на основній частоті, а розмір малої осі складає 0,25 – 0,5 від довжини великої осі. Оскільки ширина оболонки не повинна істотно перевищувати поперечний розмір п'єзокерамічного стержня, який для забезпечення переважно повздовжніх коливань стержня шляхом мінімізації пов'язаних коливань обирається в два і більше разів меншим повздовжнього розміру стержня, вона зазвичай складає менше $0,1\lambda_{об}$, де $\lambda_{об}$ - довжина хвилі сигналу в оболонці на резонансній частоті. Цим пояснюється практична відсутність розподілення коливань в напрямку ширини оболонки. Але, як відомо, для забезпечення прийняттого узгодження з середовищем бажано, щоб розміри перетворювача були одного порядку з величиною λ . Тому його зазвичай збирають із декількох модулів в аксіальний набір протяжністю не менше $(0,25 - 1) \lambda$.

Поєднання в повздовжньо-згинному перетворювачі двох елементів, які коливаються кожен на своїй моді, принципово відрізняє його від інших типів перетворювачів і суттєво ускладнює його теоретичний аналіз. Тому скоріш за все цим і пояснюється те, що пошук підходів до раціональної побудови коливальної системи з таких типів перетворювачів в СРСР, спочатку проводився експериментальним шляхом. Наприклад, були виконані експериментальні дослідження залежності ширини смуги частот від коефіцієнту механічного зв'язку п'єзокерамічного стержня двох зігнутих пластин, які створювали оболонку [6].

Складність коливальної системи повздовжньо-згинного перетворювача зумовлює множину поєднань його вихідних геометричних і фізичних параметрів і пов'язані з цим складнощі з його експериментальними дослідженнями. Враховуючи це є доцільним звернення до результатів теоретичних досліджень, отриманих при розгляді еквівалентної схеми перетворювача за допомогою енергетичного методу.

В Радянському Союзі вже була спроба у відкритому доступі представити такий перетворювача у вигляді еквівалентної схеми, це показано в [7]. У розглянутій моделі, оболонка замінена двома симетричними круговими арками з малим кутом розкриву, який навантажує п'єзокерамічний стержень на торцях. Прийнято припущення, що арки при коливаннях не змінюють своєї довжини і зберігають кругову форму, а змін зазнає лише радіус кривизни арок. Еквівалентна маса і гнучкість оболонки отримані через вирази, відповідно до її кінетичної і потенціальної енергії, а п'єзокерамічний стержень представлений статичною гнучкістю і еквівалентною масою. Активна складова опору випромінювання r_s визначена по величині зміни об'єму, який займає оболонка, змінюючи свою кривизну при повздовжній деформації стержня, реактивна складова x_s - з умови зв'язку його з величиною r_s для еквівалентного перетворювача у вигляді малого сферичного монополя.

Слід відразу відмітити, що, нажаль, примітивізація моделі і методу розрахунку привела до абсолютним значенням розрахункових параметрів, значно відмінним від тих, які можна реалізувати на практиці. При аналізі перетворювача, не враховувалась деформація серединної поверхні оболонки, але розглянутий більш загальний випадок, коли кут розкриву оболонки може бути будь-яким. Еквівалентна маса і гнучкість отримані з виразів для відповідних видів енергії, причому точка приведення вибрана на більшій осі оболонки, в місці з'єднання оболонки зі стержнем. П'єзокерамічний стержень представлений у вигляді Т-подібного чотирьох полюсника, описаного одним членом, який характеризує реактивну складову його імпедансу. Такий електричний підхід до складання еквівалентної схеми, звісно, викликає заперечення. Коефіцієнт електромеханічної трансформації виражений як статичний коефіцієнт п'єзокерамічного стержня, з чим також складно погодитись, оскільки в коливальній системі, яка включає оболонку з не п'єзокерамічного матеріалу, цей коефіцієнт значно менший, чим статичний. Розрахунок активної та реактивної складових імпедансу випромінювання,

виконаний шляхом представлення перетворювача в акустичному полі у вигляді пульсуючого сферичного джерела однакової продуктивності. Це припущення достатньо умовне, особливо по відношенню до ближнього акустичного поля, так як амплітуда зміщення поверхні оболонки характеризується глибоким розподілом з протифазними ділянками, а хвильові розміри перетворювача сумірні з довжиною хвилі.

З використанням еквівалентної схеми виконана порівняльна оцінка випромінюючої потужності в залежності від геометрії перетворювача і напрацьовані деякі рекомендації з приводу вибору геометричних параметрів. Виявлені в цілому вірні тенденції і можна погодитись з представленими відносними оцінками. Хоча аналіз виконаний для перетворювачів з п'єзокераміки складу ЦТБС-3, зроблені висновки з деякою поправкою можна використовувати і для складу PZT-4. Зокрема, для ефективного зниження розміру при фіксованому абсолютному розмірі п'єзокерамічного стержня рекомендується вибирати кут розкриву оболонки $2\varphi_0$ в рамках $20^\circ < \varphi_0 < 50^\circ$. На прикладі розрахунку перетворювача зі стержнем з п'єзокераміки і оболонкою зі сталі показано, що зі збільшенням кута φ_0 частота резонансу зростає і у вказаному діапазоні значень кута φ_0 можливе зменшення частоти в 4 рази. Додаткове зменшення частоти в 1,5 рази можливе у воді, за рахунок впливу коливальної маси. Зроблений висновок, що при однаковій резонансній частоті, повздовжньо-згинний перетворювач має в декілька разів менші габарити, аніж звичайний стержневий перетворювач. На відміну від стержневого перетворювача з накладками, повздовжньо-згинний дозволяє отримувати таке ж пониження резонансної частоти при меншій масі пасивного елементу (оболонки).

Із розрахованих частотних характеристик акустичної потужності отримано, що у вказаних вище границях значення кута розкриву, відносна смуга пропускання частот може складати 30 - 40% і вище.

Основні недоліки використаної для розрахунків моделі полягають у тому, що не враховані реальні форми розподілу зміщень в елементах коливальної системи, які суттєво залежать від геометричних і фізичних параметрів цих елементів, а також реальна конфігурація перетворювача, яка визначає його характеристики в акустичному полі (імпеданс випромінювання і характеристику направленості).

В наш час в необмеженому доступі опубліковані лише матеріали по дослідженням акустичного поля нескінченного еліптичного циліндра з рівномірним розподілом коливань на поверхні [9, 10], або з розподілом, який можна описати конусною функцією [11, 12], тобто без протифазних ділянок коливань на випромінюючій поверхні, відношення площ яких в повздовжньо-згинному перетворювачі в кращому випадку складає 1:5.

Нажаль, результати досліджень повздовжньо-згинного перетворювача, які виконані на основі більш коректної моделі, викладені в науково-технічних звітах, які мають статус рукописних робіт. Оскільки задача роботи складається в порівнянні параметрів перетворювачів, в яких використана п'єзокераміка PZT-4, з перетворювачами, описаними у звіті, коректність порівняння може бути забезпечена у випадку використання однакового алгоритму розрахунків.

Формули, які використовуються для розрахунку повздовжньо-згинного взяті з [8].

Однак неможливо не відмітити, що дані, які опубліковані у відкритому доступі не відображають глибини теоретичних та експериментальних досліджень повздовжньо-згинного перетворювача, виконаних в останні роки. В наш час досліджені повздовжньо-згинні перетворювачі з частотою основного резонансу у воді від 500 до 5500 Гц і проведені довгострокові випробування на усталену міцність з напрацюванням $0,5 \cdot 10^{10}$ циклів коливань на резонансній частоті з максимальною амплітудою зміщення оболонки з титану до 70 мкм. Електроакустичні параметри перетворювачів мають задовільні значення при прийнятних масо габаритних параметрах. Наприклад,

випромінююча потужність перетворювача з частотою близькою до 1000Гц склала близько 3000 Вт, чутливість по напрузі в режимі випромінювання – більше $20 \text{ Па} \cdot \text{м} / \text{В}$, електроакустичний ККД більше 50%, ширина смуги пропускання – більше 30%, а маса – до 170 кг. Конструкція цього перетворювача виконана компенсованою, тому у внутрішній порожнині, яка заповнена компенсуючою рідиною, вміщуються елементи, які забезпечують акустичне розвантаження внутрішньої поверхні оболонки. Не менш цікавою можна вважати і силову конструкцію, оскільки при умові достатнього тепловідводу маса такої конструкції значно менша, за масу компенсованої.

Як слідує з викладеної інформації, опублікованих у відкритому доступі матеріалів недостатньо для кваліфікованого проектування перетворювача. Тому аналіз потенційних можливостей перетворювача в основному будуть базуватись на перевіреному експериментальному досвіді проектувальників.

Теоретичний аналіз повздожно-згинного перетворювача виконаний на основі відомих з відкритих науково-технічних джерел технічних рішень і еквівалентної схеми, яка представлена в загальному випадку на рис. 1 і трансформованої для цього перетворювача у вигляді, показаному на рис. 3. Формули для розрахунку параметрів еквівалентної схеми приведені віще в табл.1.

У відкритій науково-технічній літературі згадуване джерело єдине, по якому, не вдаючись до громіздких ПО та потужних ЕОМ, можна провести розрахунок параметрів повздожно-згинного перетворювача з задовільним ступенем достовірності, шляхом порівняння розрахункових та експериментальних параметрів макета повздожно-згинного перетворювача з резонансною частотою 900 Гц.

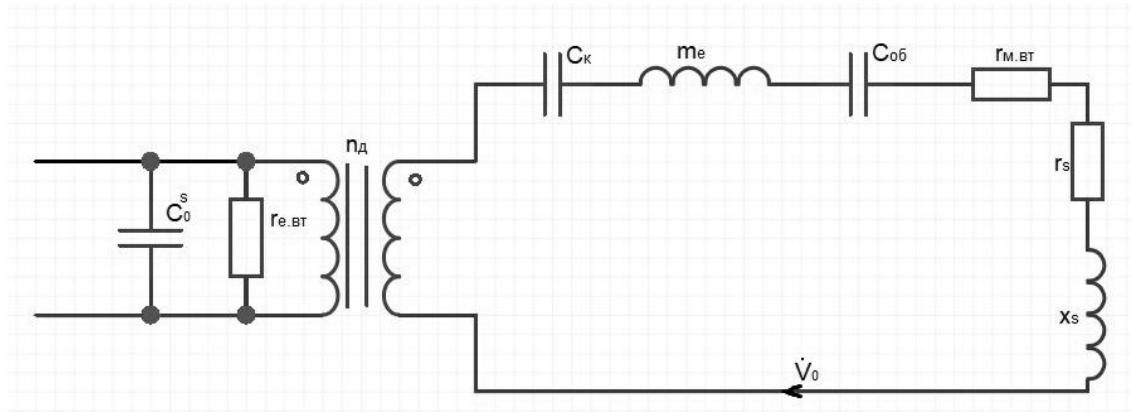


Рис.3. Еквівалентна електромеханічна схема п'єзокерамічного повздовжньо-згинного перетворювача

Доцільно буде прослідкувати розвиток повздовжньо-згинної концепції з використанням п'єзокераміки PZT-4.

Хоча в деяких американських джерелах частково викладені підходи до розрахунку коливальної системи повздовжньо-згинного перетворювача [13], але в їх основі лежить не енергетичний підхід, а математичне моделювання, зокрема, метод послідовних наближень в поєднанні з ефектами монопольної, квадрупольної і октупольної моделі коливань з подальшим устанавленням вкладу кожної з них, виходячи з вибору відношень геометричних параметрів. Такий метод не дозволяє досягнути прийнятного фізичного спрощення і звести до мінімуму помилки в окремих апроксимаціях, прийнятих для фізичного пояснення перетворювача, оскільки при такому підході наявність виконання прийнятих апроксимацій може бути перевірена тільки як сумарна за результатами всіх вимірювань і порівнянню сукупного ефекту всіх допущень з експериментально встановленими параметрами перетворювача [4].

Лише після 10 років початку досліджень в США спостерігається повторне звернення до традиційно прийнятої в гідроакустиці методології для аналізу повздовжньо-згинного перетворювача, все ще розглянутого як особливий тип низькочастотного випромінювача.

Тільки на початку 80-х років в огляді стану розробки повздовжньо-згинних перетворювачів [14] після критики “громіздких моделей для ЕВМ, які відрізнялись точністю, але були занадто дорогими і складними”, вказувалось

що з використанням еквівалентної схеми були розраховані вихідні параметри перетворювача і зроблені висновки, що повздовжньо-згинний перетворювач при “найменших масо габаритних параметрах забезпечую велику потужність, більш широку смугу пропускання та ефективність, чим будь-який інший п’єзокерамічний перетворювач” в діапазоні частот від 100 Гц до, майже, 10 кГц. ” Хоча ця заява містить явно рекламний характер, тим не менше вона відображає думку спеціалістів щодо потенційних можливостей таких перетворювачів. У згаданому звіті приведена кількісна залежність випромінюючої потужності W_a , віднесеної до одиниці маси m і механічної добротності Q_m від резонансної частоти (без урахування маси, що вноситься конструкцією перетворювача), достовірність якої не підтверджена. Тим не менш, для частоти $f_p = 600 \text{ Гц}$ відносна потужність W_a/m виходячи з цієї кривої, тобто з урахуванням тільки маси коливальної системи, а не всього перетворювача в цілому, при Q_m , рівній 3 і 5, може складати відповідно 12 Вт/кг і 20 Вт/кг (при напруженні електричного поля $E_{33} = 3 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}$). Ця оцінка виконана для п’єзокераміки PZT-8, причому вказано, що максимальна глибина занурення перетворювача не більше 1500 футів (тобто до 490 м). Якщо зіставити вказане значення W_a/m з умовами ТЗ, то виявляється, що задане значення забезпечити складно, тим паче, що в даному випадку використовується склад середньої жорсткості PZT-4, а не спеціально призначений для випромінювання PZT-8.

Висновки огляду, спогад про те, що повздовжньо-згинні перетворювачі доволі-таки гарно вивчені і широко використовуються в багатьох системах, а також можуть бути використані в гідролокаторах систем як разового призначення, так і корабельних, це все свідчить про серйозність намірів по практичній реалізації таких випромінювачів для різних призначень.

В компактній формі припущення, прийняті при виборі моделі, формулюють так:

коливальна система перетворювача збалансована, так як у відповідності з умовами взаємного жорсткого з'єднання оболонки і п'єзокерамічного пакету, в обох сторонах від неї пакетом збуджуються коливання, які зрівноважують один одного в площині кривизни оболонки;

коливальна система симетрична відносно великої і малої осі еліпсоподібної оболонки, тому оболонка представлена у вигляді складеної з двох однакових кругових арок, які з'єднані між собою в одне ціле поблизу великої осі; на цій підставі параметри кругових арок задані і їх коливання розглянуті в циліндричній системі координат;

ширина оболонки "t" в площині, перпендикулярній площині її кривизни, визначається габаритами п'єзокерамічних елементів в площині поперечного перерізу пакету і має величину порядку $d_{33} = 260 \cdot 10^{-12} \text{ К / Н}$ довжина хвилі в оболонці на робочих частотах; вказане відношення зумовлює майже повну відсутність розподілу коливань вздовж ширини оболонки і тому аналіз коливань зводиться до вирушення плоскої задачі;

динамічна деформація коливальної системи розглянута в рамках гіпотез Кірхгофа-Лява для тонкого стержня і тонкої арки, тобто у припущенні, що товщина п'єзокерамічного пакету h_k і оболонки $h_{об}$ в поперечному перерізі суттєво (практично на 1-2 порядки відповідно) менша їх повздовжніх розмірів; на цій підставі, елементи, які створюють оболонку представлені у вигляді дуг окружності, а поперечні деформації п'єзокерамічного пакету не враховуються; таке припущення справедливе в нижній частині спектру частот акустичних коливань, які представляють практичний інтерес, оскільки в цьому діапазоні частот довжина повздовжніх хвиль λ_k велика по відношенню з розмірами поперечного перерізу пакету ($\lambda_k > h_{об}$) ;

електричні змінні сполученого електропружного поля визначаються особливостями виконання п'єзокерамічного пакету у вигляді набору п'єзоелементів; відстань "Δ" між електродами яких значно менша довжина

пакету $l(\Delta \ll l)$; поверхні електродів еквіпотенціальні, тому відмінна від нуля лише повздовжня складова вектору електричної напруженості E_{33} . Прийняті припущення значно спрощують математичний апарат при розгляді механічних коливань, залишаючи його в рамках вказаних відношень розмірів і довжин хвиль цілком придатним для опису динамічного стану повздовжньо–згинного перетворювача в низькочастотному діапазоні коливань (сотні Гц – одиниці кГц).

Як видно з табл.1, розрахунок параметрів еквівалентної схеми пропонується проводити по відповідним формулам, які наведені в [8], за винятком коефіцієнту електромеханічної трансформації. Формула із [8] для коефіцієнту n_g замінена на іншу формулу, яка враховує динамічний характер цієї величини і отриманої з визначення динамічного коефіцієнту електромеханічного зв'язку k_g [15] :

$$k_g = \frac{n_g^2 C_9}{C_o^S + n_g^2 C_9}$$

Під час розрахунку еквівалентної гнучкості C_9 враховано, що згідно еквівалентної схеми (рис. 3) вона має бути представлена у вигляді послідовного електричного з'єднання еквівалентної гнучкості оболонки C_{o6} і гнучкості п'єзокерамічного пакету C_k , отриманої з виразу для механічного імпедансу $Z_k = -\frac{1}{2}(\rho c S)_k \operatorname{ctg} \left(\frac{K_k l}{2} \right)$ п'єзокерамічного стержня, представленого як Т-подібний чотирьохполюсник, приклад такого представлення показано в [5]. Розрахунок імпедансу перетворювача базується на його зміні в акустичному полі пульсуючим сферичним монополем такої ж продуктивності, тому складова імпедансу розраховується шляхом введення поняття ефективного радіусу еквівалентної пульсуючої сфери. З використанням параметрів еквівалентної схеми визначаються значення частоти резонансу у повітрі f_0 і воді f_p . Опір електричних і механічних втрат визначається з урахуванням

експериментальних даних згідно уявленням, викладеним у розділі 2.2. Придатність приведених в табл. 1 формул для розрахунку параметрів повздовжньо-згинного перетворювача продемонстрована на контрольному прикладі розрахунку шляхом порівняння розрахункових даних з експериментальними для приладу ІМ2-ЕІ079. На основі описаного вище і перевіреного розрахункового апарату виконана розробка структурної схеми і оцінені основні параметри повздовжньо-згинного перетворювача з резонансною частотою 600 Гц. Вибір співвідношень між геометричними параметрами коливальної системи здійснений для забезпечення, можливо, більшої випромінюючої потужності шляхом компромісного задоволення деяких вимог:

- максимізація величини динамічного коефіцієнту електромеханічного зв'язку k_g ;
- максимізації ефективності (електроакустичного ККД);
- мінімізація відносної площі поверхні з протифазними коливаннями (поблизу торців п'єзокерамічного пакету).

Факторами, визначення геометричних параметрів, були обрані:

- 1) величина розміру перетворювача вздовж більшої осі в поперечній площині $2a = (0,2 - 0,25)\lambda$, встановленого з урахуванням можливості фізичної реалізації і зручності експлуатації великогабаритного перетворювача з частотою $f_p = 600 \text{ Гц}$;
- 2) габарити п'єзоелементів (шайб) для п'єзокерамічного пакету такі ж, як і обрані при розрахунку перетворювача на основі складу ЦТБС-3: $D/d \times \Delta = (100/70 \times 7) \text{ мм}$ (де D і d - відповідно зовнішній і внутрішній діаметри, Δ - відстань між електродами), також фізико-механічні характеристики матеріалів для, складеного з кераміки PZT-4, стержня (швидкість звуку при повздовжньому п'єзоєфекті в постійному електричному полі $C_{33}^E = 2600 \text{ М / с}$ і відповідний модуль Юнга $E_{33}^E = 0,51 \cdot 10^{11} \text{ Н / м}^2$ при густині $\rho_k = 7,5 \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$ повздовжній

п'єзомодуль $d_{33} = 260 \cdot 10^{-12} \text{ К / Н })$ і оболонки з титанового складу (швидкість звуку в титані $C_{об} = 4900 \text{ м / с}$ і модуль Юнга $E_{об} = 1,08 \cdot 10^{11} \text{ Н / м}^2$ при густині $\rho_{об} = 4,5 \cdot 10^3 \text{ кг / м}^3$).

Вибір титану зумовлений вибору однакових умов для порівняння перетворювачів з кераміки ЦТБС-3 та PZT-4, а також його низькою густиною і не магнітність по відношенню до сталі, краща корозостійкість у воді у порівнянні з алюмінієм. Структурно, досліджуваний повздовжньо-згинний перетворювач, являє собою співвісний набір ідентичних модулів, механічно розв'язаних між собою і закріплених між металічними фланцями, які закривають, герметично, внутрішню порожнину перетворювача з торців. Модулі електрично з'єднані між собою паралельно. Електричний вивід виконаний кабелем, який забезпечує подачу електричної напруги не менше 2000 В.

Кожен модуль виконаний у вигляді повздовжньо-згинної структури, а саме, має пакет з 50 активних шайб і двох ізоляторів на торцях, встановлений у пружню оболонку еліптичної форми з титанового сплаву товщиною $h_{об} = 20 \text{ мм}$ і шириною $t = 110 \text{ мм}$. Шайби в пакеті електрично з'єднані паралельно шляхом відповідного монтажу електродів з латуні товщиною 0,2 мм. Загальна довжина п'єзокерамічного пакету з технологічними металічними масами на торцях $l = 460 \text{ мм}$. Кут розкриву двох арок, які створюють оболонку, $2\varphi_0 = 60^\circ$, радіус дуги (серединної поверхні арок) $R_0 = 475 \text{ мм}$.

Розміри модуля по активній поверхні $2a \times 2b = (530 \times 148) \text{ мм}$, висота модулю по активній поверхні $H = 110 \text{ мм}$. В табл.2 зведені розрахункові параметри еквівалентної схеми модуля а в табл. 3 – вихідні параметри, включаючи вихідні параметри, включаючи вихідні параметри модуля і всього описаного вище повздовжньо-згинного перетворювача на частоті основного резонансу. Геометричні параметри цього перетворювача повністю відповідають викладеним вище обмеженням.

Таблиця 2

Найменування і означення параметрів, розмірність	Розрахункові значення	Примітки
Еквівалентна маса, m_e , кг	9,47	$\beta_m = 4,005$ $A_1 = 21,48$ $A_2 = 1,13$
Еквівалентна гнучкість C_e , м/Н	$3,65 \cdot 10^{-9}$	$C_{об} = 56,03 \cdot 10^{-9}$ $C_k = 3,904 \cdot 10^{-9}$
Електрична ємність загальмованого модулю C_o^s , мкФ	3,0	$C_o^r = 0,33$
Опір електричних втрат $r_{ел.втр}$, кОм	20,0	$tg \beta = 0,04$
Динамічний коефіцієнт електромеханічної трансформації n_g , Н/В	2,6	
Опір механічних втрат $r_{мех.втр}$, $H \cdot c / м$	1180	Добротність ненавантаженого перетворювача: $Q_{н.п} = 75$ (з урахуванням експериментальних даних)
Активна складова імпедансу випромінювання r_s , $H \cdot c / м$	11970	

Реактивна складова імпедансу випромінювання $x_s, H \cdot c / m$	39400	$R_e = 0,12 m$ $\alpha = 0,08$ $\beta = 0,27$
--	-------	---

В забезпеченні достатнього акустичного навантаження перетворювача у водному середовищі його активна висота вибрана $H \leq 0,5\lambda$, що відповідає осьовому набору з десяти модулів. Габаритні хвильові розміри перетворювача по активній поверхні $2a \times 2b \times H = (0,21 \times 0,06 \times 0,46)\lambda$. Орієнтовна маса перетворювача силової конструкції з кабелем, довжиною 320м дорівнює 475 кг.

Параметри перетворювача з десяти модулів представлені в табл.3

Таблиця 3

Найменування і означення параметрів, розмірність	Розрахункові значення	Примітки
Частота резонансу у повітрі $f_0, \text{Гц}$	856	
Частота резонансу у воді $f_p, \text{Гц}$	600	Приєднана маса $m_s = 9,97 \text{ кг}$
Електроакустичний ККД η_{ea}	0,6	З урахуванням експериментальних даних
Активна складова електричного імпедансу модулю $R_{ex}, \text{Ом}$	1770	
Ширина смуги пропускання частот $\Delta f, \text{Гц}$	90-120	При добротності у воді $Q_m = 5-6$ (з урахуванням експериментальних даних)
Активна складова електричного імпедансу перетворювача $R_{ex}, \text{Ом}$	177	$R_{ex} = R_{ex}' / 10$
Акустична потужність при електричному навантаженні $U = 2000 \text{ В } W_a, \text{Вт}$	13550	Вказаному значенню відповідає $E_{33} = 2,85 \cdot 10^5 \text{ В / м}$
Нерівномірність х-ки направленості $\xi, \text{дБ}$: • в поперечній площині	$\pm 0,9$	Коефіцієнти концентрації:

• в повздовжній площині	$\pm 1,95$	$\Omega_1 = 1,1$ $\Omega_2 = 2,3$ $\Omega = \sqrt{\Omega_1 \cdot \Omega_2} = 1,6$
Чутливість в режимі випромінювання $\beta_v, \text{Па} \cdot \text{м} / \text{В}$	25	При $\Omega = 1,6$

Порівняння приведених, в таблиці 3, параметрів з вимогами ТЗ показує, що при використанні кераміки PZT-4 – створення повздовжньо-згинного перетворювача, який би задовольняв вимоги по частоті резонансу, смузі пропускання, електроакустичному ККД і нерівномірності характеристики направленості – можливе. Робоча глибина занурення перетворювача, силова конструкція якого виконана з розрахунком, що армоване напруження в п'єзокераміці $\delta_a \geq 70 \text{ МПа}$ при динамічних напруженнях $\delta_o \geq 72 \cdot 10^5 \text{ Н} / \text{м}^2$, які відповідають питомій потужності $W_m = 1,06 \cdot 10^4 \text{ Вт} / \text{м}^2$, складає не менше 300м.

Відносна акустична потужність перетворювача $W_{a/m} = \frac{13550 \text{ Вт}}{475 \text{ кг}} = 28,5 \text{ Вт} / \text{кг}$

також задовольняють заданому значенню $W_{a/m} = 25 \text{ Вт} / \text{кг}$. Такий енергетичний потенціал, як видно з табл. 3, досягається при рівні електричної напруженості $E_{33} = 2,85 \cdot 10^5 \text{ В} / \text{м}$, який можна вважати безпечним, як для кераміки, яка використовується при виготовленні, так і для перетворювача в цілому. Згадуване вище значення динамічне напруження $\delta_o \geq 72 \cdot 10^5 \text{ Н} / \text{м}^2$ можна вважати цілком безпечним, з позиції забезпечення усталеного циклічного навантаження перетворювача.

3.3. Циліндричний вільно обтічний перетворювач

Зниження робочих частот кільцевих гідроакустичних перетворювачів викликає серйозні труднощі конструктивно - технологічного характеру, пов'язані перш за все, з ростом масо габаритних параметрів коливальної системи. Один з можливих методів зниження робочої частоти кільцевого перетворювача при одночасній мінімізації його масо габаритних характеристик оснований на використанні властивостей внутрішньої порожнини циліндричного перетворювача компенсованої конструкції.

З циліндричних перетворювачів компенсованої конструкції найбільш розповсюджені перетворювача водо заповнені або вільно обтічні, у яких компенсація зовнішнього гідростатичного тиску здійснюється за допомогою води, яка вільно протікає через внутрішню порожнину перетворювача. Характерною особливістю таких перетворювачів є наявність об'ємних резонансів, які визначаються резонансними властивостями об'єму води у внутрішній порожнині перетворювача і резонансними властивостями п'єзокерамічного кільця, які в свою чергу являються функціями геометричних і хвильових характеристик перетворювача.

Найбільший інтерес для практичного використання представляє перший об'ємний резонанс, по шкалі частот він знаходиться нижче частоти резонансу радіальних пульсацій ненавантаженого п'єзокерамічного кільця.

Циліндричні вільно обтічні перетворювачі мають ряд важливих переваг:

1. Можливістю реалізації перетворювача з малими хвильовими і масо габаритними характеристиками.

2. Практично не обмеженим діапазоном робочих глибин за рахунок реалізації умов всебічного стиснення в п'єзокераміці, при яких зберігається механічна міцність і практично не змінюються електрофізичні параметри п'єзокераміки і, відповідно, вихідні і вхідні параметри перетворювача.
3. Можливістю випромінювання сигналів в більш широкій смузі частот в порівнянні з одно резонансними системами за рахунок регулювання різниць частот між першим і другим об'ємними резонансами шляхом змінення геометрії кільця – відношення висоти до діаметру.

Слід зазначити ряд факторів, які обмежують використання кільцевих вільно обтічних перетворювачів, а саме:

1. Акустичну взаємодію між зовнішньою і внутрішньою випромінюючими поверхнями п'єзокерамічного кільця, здатну привести до короткого замикання, наслідком якого буде зниження опору випромінювання, а також акустико-механічного ККД.
2. Виникнення у внутрішній порожнині перетворювача звукового тиску, який перевищує тиск на зовнішній випромінюючій поверхні, що приводить до виникнення ранньої кавітації у внутрішній порожнині, і, як наслідок, до змінення параметрів перетворювача в цілому.
3. Збільшення ступеня взаємодії перетворювачів, що розміщені в системі співвісно на невеликій відстані один від одного, через обмін енергіями внутрішніх порожнин.

Можливість реалізації циліндричних вільно обтічних перетворювачів підтверджується цілим рядом перетворювачів, які пропонують такі компанії, як “2TC” і “Edo Westen Corporation” [16], [17]. Однак, враховуючи необхідність задоволення потреб сучасної гідроакустики в низькочастотних (нижче 1 кГц) перетворювачах, стало питання першорядності теоретичних опрацювань, оскільки вартість виготовлення макетів для експериментального опрацювання габаритних перетворювачів – висока.

В наш час розроблений енергетичний метод дослідження характеристик електромеханічних перетворювачів із п'єзокераміки [18]. Метод є достатньо ефективним, оскільки дозволяє швидко і з наглядним врахуванням основних фізичних закономірностей виконати вибір геометричних розмірів і розрахунок основних параметрів перетворювача.

Згідно вказаному методу, розрахунок параметрів циліндричних перетворювачів в околі частоти резонансу радіальних пульсацій може бути виконаний за допомогою еквівалентної електромеханічної схеми (рис.1)

Якщо відомі параметри цієї схеми, а також коефіцієнт концентрації Ω , легко розрахувати частотну характеристику будь-якого електроакустичного параметра перетворювача. Частотні характеристики Z_s, Ω і характеристики направленості можна отримати в результаті розрахунку акустичного поля перетворювача.

Достатньо точної теорії акустичного поля циліндричного вільно обтічного перетворювача поки що не створено. Основна складність полягає в тому, що кінцевий циліндр не є координатною поверхнею у відомих системах координат, тому не має системи власних функцій. В сучасній зарубіжній науково-технічній літературі по цьому питанні є лише наближені методи розрахунку полів таких перетворювачів.

В [19] в якості першого наближення теорії акустичного поля водо заповненого циліндричного перетворювача використовується вирішення задачі акустичного випромінювання тонкого тора. Порівняння теоретичної і експериментальної характеристик направленості для частот радіального і об'ємного резонансів показало, що тонкий тор може бути прийнятною моделлю низького водо заповненого кільця (при відношенні висоти до діаметру менше 0,5) лише на частотах, близьких до радіального резонансу.

Також була представлена формула в [20] для розрахунку частоти об'ємного резонансу стовпа води в порожнині відкритої труби. В основу приведеної формули входять основні допущення, справедливі для одномірної

моделі розповсюдження звуку в вузьких трубах з урахуванням кінцевої жорсткості стінок. Результати експерименту підтверджують теоретичні дані переважно в діапазоні відношень висоти до діаметру $>0,5$.

Характерним недоліком приведених вище [19] і [20] являється відсутність виразів, які б визначали імпеданс випромінювання, значення якого необхідно знати для оцінки частотних характеристик електроакустичних параметрів перетворювача. В [20] також немає виразу, який би визначав вид характеристики направленості циліндричного вільно обтічного перетворювача.

В більш пізніх зарубіжних роботах розвинені чисельні методи, які дозволяють визначити акустичне поле перетворювачів, форма поверхні яких не співпадає ні з однією координатною поверхнею такого типу. Рішення задачі випромінювання ґрунтується на чисельних методах, які використовують інтегральне рівняння Гельмгольца [21]. Слід відмітити, що всі чисельні методи вирішення задач випромінювання звуку поверхнями складних форм, приводять до необхідності виконання великих об'ємів розрахунків, а успіх в цьому напрямленні найчастіше залежить від можливостей ЕРМ.

Тому, враховуючи викладені вище міркування, логічним буде використати результати, які отримали вітчизняні автори.

В [22] на основі інтегрального рівняння Гельмгольца розроблений алгоритм і програма для ЕРМ, яка дозволяє розрахувати опір випромінювання кінцевого циліндра і поле на його поверхні в широкому діапазоні хвильових розмірів при змішаних граничних умовах і осе симетричному збудженні. Достовірність результатів розрахунку підтверджується порівнянням з різними граничними випадками і з результатами, які отримані з використанням аналітичних, на пів аналітичних і чисельних методів.

В цьому випадку розглянуто випромінювання звуку порожнистим кінцевим циліндром, відкритим з торців, при осе симетричних коливаннях стінок. Парні інтегральні рівняння відносно трансформант Фур'є звукових тисків на внутрішній і зовнішній сторонах стінок порожнистого циліндру

приведені до інтегрального рівняння Фредгольма 2-го роду. Отримані вирази для опору випромінювання, коефіцієнту концентрації, звукового тиску в дальньому полі та характеристика направленості. При розрахунках було прийнято, що коливальні швидкості внутрішньої і зовнішньої поверхні циліндра – однакові.

В [2] є характеристики акустичного поля кільцевого вільно обтічного перетворювача у вигляді частотних залежностей імпедансу випромінювання, коефіцієнту концентрації і характеристики направленості. В подальшому звіті використані матеріали саме з джерела [2] для визначення основних параметрів перетворювача.

У зв'язку з відсутністю даних про елементну базу п'єзокераміки складу PZT-4 будемо вважати, що для побудови коливальної системи у вигляді кільця використовуються п'єзоелементи, габарити яких такі ж, як і у п'єзоелементів кераміки ЦТБС-3, тобто в даному випадку габарити призм складають: $L \times B \times \Delta = 100 \times 30 \times 9,8 \text{ мм}$. Згідно прийнятого припущення, п'єзокерамічне кільце буде складатись із 230 призм, між якими розміщені цільні латунні електроди. Також будемо вважати, що технологія виготовлення п'єзокерамічного кільця зі складу PZT-4 аналогічна технології виготовлення вітчизняних виробників.

Геометричні характеристики п'єзокерамічного кільця:

зовнішній діаметр	750 мм
внутрішній діаметр	690 мм
висота	100 мм
маса п'єзокерамічного кільця	50 кг.

Кільце армується сталевим дротом через шар склотекстоліту. Габарити армованого п'єзокерамічного кільця:

зовнішній діаметр	755 мм
внутрішній діаметр	690 мм

висота

111 мм.

Маса армованого п'єзокерамічного кільця 51 кг (рис. 4).

Враховуючи позитивний досвід конструктивного оформлення герметизації зовнішньої і внутрішньої поверхонь п'єзокерамічних кілець, шляхом компаундування з подальшим кріпленням титанових обичайок, завтовшки 1,5 мм, на зовнішню і внутрішню бокові поверхні, можна очікувати, що зовнішній діаметр буде 774 мм, а внутрішній 671 мм. Шляхом підбору висоти кільцевого перетворювача – отримуємо необхідну частоту резонансу.

Для отримання резонансу на частоті 600 Гц, перетворювач на базі, описаного вище кільця, повинен мати висоту близько 530 мм. Щоб отримати таку висоту, перетворювач має складатися з п'яти герметизованих кілець. Таким чином, готовий перетворювач буде мати висоту 570 мм (з урахуванням герметизації).

Враховуючи також і конструктивне оформлення перетворювача, він буде мати масу 385 кг і хвильові розміри $(D_{\text{зовн.}} \times H)\lambda = (0,31 \times 0,224)$ де λ - довжина хвилі у воді; H – висота перетворювача; $D_{\text{зовн.}}$ - зовнішній діаметр.

Розраховані значення параметрів еквівалентної схеми представлені в табл. 4.

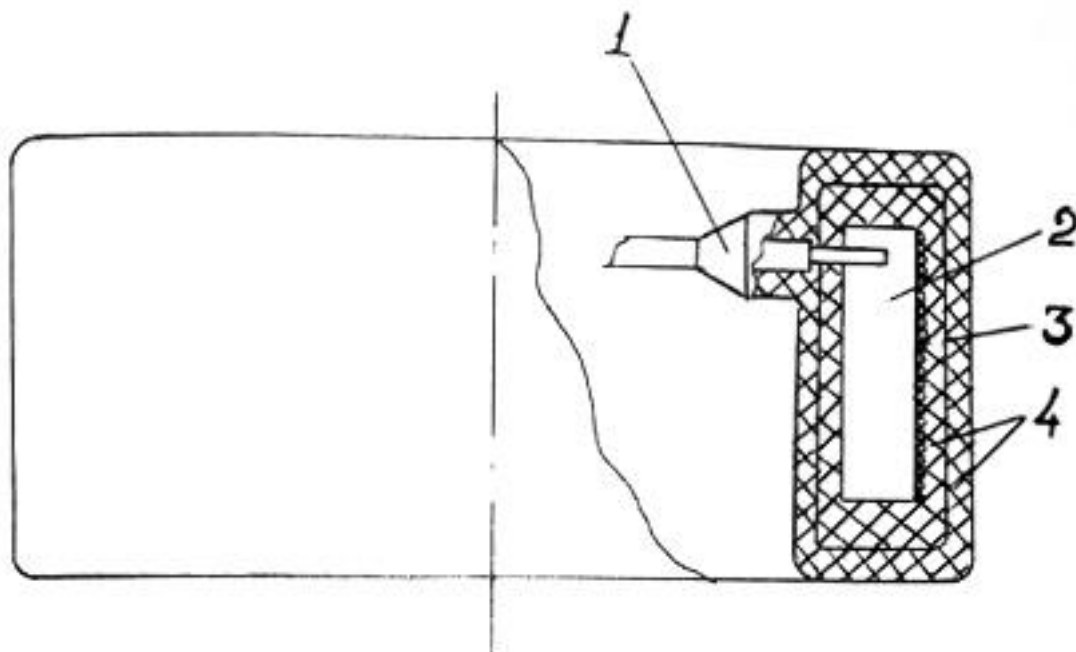


Рис. 4. Схематичне зображення герметизованого вільно обтічного циліндричного перетворювача:

- 1 – електричний ввід;
- 2 – армоване п'єзокерамічне кільце;
- 3 – фольга;
- 4 – компаунд

Таблица 4

Найменування і означення параметрів, розмірність	Розрахункові значення	Примітки
1. Еквівалентна маса $m_e, кг$	255	
2. Еквівалентна гнучкість $C_e, м / Н$	$0,572 \cdot 10^{-10}$	Швидкість звуку в армованому кільці $C_{33}^E = 2900 \frac{м}{с}$
3. Електрична ємність загальмованого перетворювача $C_0^S, мк / Ф$	2,64	Коефіцієнт електромеханічного зв'язку $k=0,585$. Відстань між електродами п'єзоелемента $\Delta = 9,8 мм$
4. Опір електричних втрат $r_{ел.втр}, Ом$	55600	Тангенс кута діелектричних втрат $tg \delta = 1,95 \%$

5. Коефіцієнт електромеханічної трансформації $\eta, H / B$	146	П'єзомодуль при повздовжньому п'єзоефекті $d_{33} = 260 \cdot 10^{-12} K / H$
6. Опір механічних втрат $r_{м.втр}, H \cdot c / м$	19500	Механічна добротність у повітрі $Q_{м.п} = 57$
7. Імпеданс випромінювання $Z_6, Hc / м$	$(0,344 + 3,9) \cdot 10^6$	$\alpha = 0,185$ $\beta = 2,1$ $\rho c S_{cp} = 1,86 \cdot 10^6 \text{ кг/с}$, де S_{cp} - площа серединної поверхні кільцевого перетворювача

Для визначення вихідних параметрів досліджуваного циліндричного вільно обтічного перетворювача, необхідно перш за все визначити один з важливих параметрів – коефіцієнт осьової концентрації. Розрахунки, які були проведені по [22] в попередніх розділах, показують, що характеристика направленості на частоті 600 Гц має вигляд, який показаний на рис.5. При такій направленості перетворювача, коефіцієнт концентрації $\Omega = 1,55$. Частотна залежність коефіцієнта концентрації представлена на рис. 6, в залежності від хвильового розміру kr_{cp} .

Результати розрахунків були виконані по [2] для резонансної частоти $f_p = 600 \text{ Гц}$ приведені в табл. 5.

Як видно з приведених, на рис. 5 характеристика направленості і на рис. 6 коефіцієнта концентрації в діапазоні частот, звукове поле в напрямку повздовжньої осі частково компенсується.

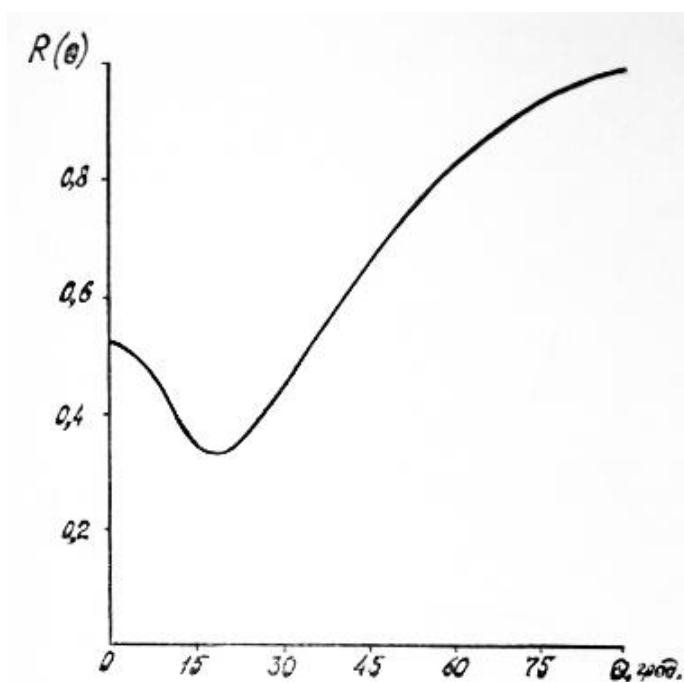


Рис. 5. Характеристика направленості циліндричного вільно обтічного перетворювача на частоті 600 Гц

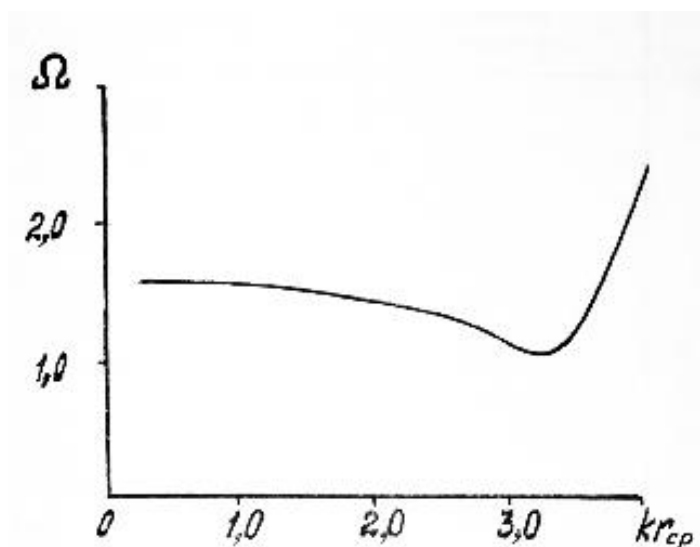


Рис. 6. Частотна залежність коефіцієнта концентрації циліндричного вільно обтічного перетворювача, де r_{cp} – середній радіус перетворювача

Характеристика направленості на вигляд схожа на Х.Н. тороїда в широкому діапазоні частот. Це можна пояснити тим, що випромінювання звуку відбувається одночасно зовнішньою і внутрішньою бічними і обома торцевими поверхнями кільця. При цьому зовнішня і внутрішня бічні поверхні майже утворюють протифазні коливання.

Найменування і означення параметрів, розмірність	Розрахункові значення	Примітки
1. Частота резонансу у повітрі $f_0, Гц$	1265	
2. Частота резонансу у воді $f_{p2} = 930 Гц$; $f_{p3} = 1520 Гц$	600	$f_{p2} = 930 Гц$; $f_{p3} = 1520 Гц$
3. Електроакустичний коефіцієнт корисної дії η_{ea}	0,61	Враховуючи технології і досвід виготовлення вітчизняних перетворювачів аналогічного типу.
4. Ширина смуги пропускання частот $\Delta f, Гц$	50	При добротності у воді $\theta_m = 12$
5. Активна складова електричного імпедансу перетворювача $R_{ex}, Ом$	18	При $\alpha = 0,185$
6. Акустична міцність при підведеній електричній напрузі $U = 1000 В$ $W_a, Вт$	33900	При $\Omega = 1,55$
7. Направленість: нерівномірність характеристики направленості в поперечній площині $\xi, дБ$ ширина характеристики направленості в повздовжній площині $\theta_{0,707}, град.$	$\pm 1,0$ 90	Враховуючи досвід експериментальних досліджень аналогічних вітчизняних перетворювачів. При рівні випромінювання на торцях $\sigma = 0,52$.
8. Чутливість в режимі випромінювання $\beta_U, Па \cdot м / В$	79	

Вклад у випромінювання торцевих поверхонь – незначний. Про чисельні співвідношення коливальних швидкостей, поверхонь активного кільця свідчать наступні дані: відносна коливальна швидкість зовнішньої поверхні $v_1 / v_2 = +0,976$, внутрішньої поверхні $v_2 / v_0 = -1,024$ і торців $v_3 / v_0 = -0,324$, де v_0 - коливальна швидкість серединної поверхні.

Перетворювач в області частот резонансу пульсуючих коливань ненавантаженого п'єзокерамічного кільця f_0 і нижче, має резонансні частоти: $f_{p1} = 600 \text{ Гц}$; $f_{p2} = 930 \text{ Гц}$ і $f_{p3} = 1520 \text{ Гц}$. На рис. 7 приведена частотна залежність чутливості досліджуваного перетворювача з максимумами в районі кожного резонансу. Поява резонансів з частотами f_{p1}, f_{p2}, f_{p3} , які відрізняються від f_0 , зумовлено резонансними властивостями води в порожнині досліджуваного перетворювача. Слід розрізняти резонанси в порожнині перетворювачів: повздовжній резонанс коливань стовпчика рідини, перший з яких відповідає висоті, близькій до $\lambda/2$, який отримав назву об'ємного резонансу, а другий – близький до $\lambda/3$; та радіальний резонанс коливань стовпчика рідини, який може бути лише при достатній висоті кільцевого перетворювача. Радіальні резонанси відповідають кореням рівнянь

$$I_0(kr_{\text{вн}})_n = 0 \text{ і } I_1(kr_{\text{вн}})_n = 0,$$

де I_0 та I_1 - функції Бесселя; k - хвильове число; $r_{\text{вн}}$ - внутрішній радіус циліндричного перетворювача.

Строго кажучи повздовжній на пів хвильовий резонанс і радіальний резонанс, який визначається рівнянням $I_1(kr_{\text{вн}})_n = 0$, слід називати анти резонансами (паралельними резонансами). На частотах анти резонансів активна складова імпедансу випромінювання, яка має тут інерційний характер, не може призупинятись, так як існують втрати на випромінювання акустичної енергії в оточуюче середовище.

Частота першого повздовжнього (об'ємного) резонансу стовпчика води, в порожнині перетворювача, не співпадає з частотою першого резонансу f_{p1} вільно обтічного кільця, як перетворювача в цілому. Резонанс з частотою f_{p1} визначається еквівалентною пружністю активних кілець з елементами конструкції і еквівалентними масами активних кілець зі спів коливальною масою оточуючої води.

Більш детально розглянуто властивості циліндричних гідроакустичних перетворювачів у статті 31.

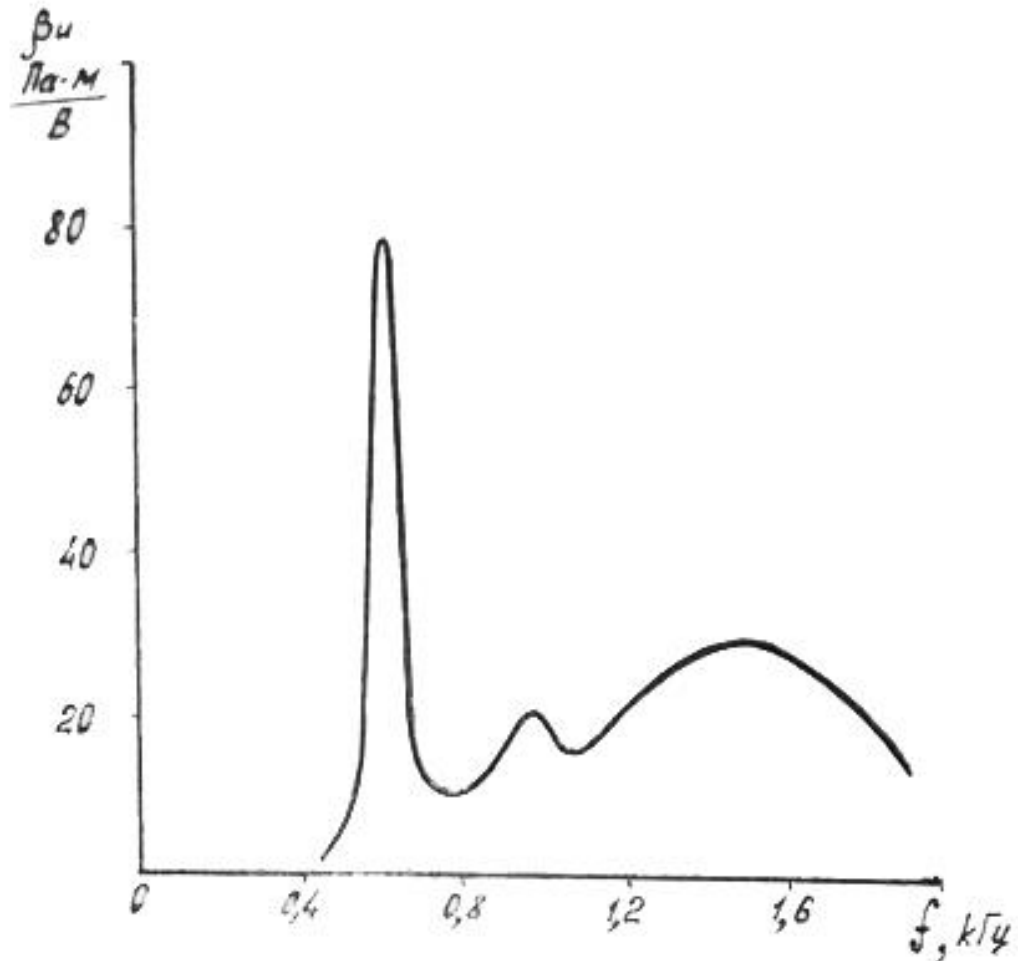


Рис. 7. Частотна залежність чутливості в режимі випромінювання циліндричного вільно обтічного перетворювача.

Збільшення еквівалентної маси коливальної системи за рахунок спів коливальної маси води приводить до зниження резонансної частоти і збільшення добротності перетворювача. В даному випадку частота першого резонансу 600 Гц (при частоті власних коливань кілець 1265 Гц) і механічна добротність $Q_m = 12$.

Досліджуваний перетворювач слабо навантажений зі сторони оточуючого середовища, про що свідчить низьке значення безрозмірного коефіцієнту активної складової імпедансу випромінювання ($\alpha = 0,185$). Це приводить до зниження коефіцієнту корисної дії, а також до зменшення активної складової електричного імпедансу ($R_{\text{ак}} = 18 \text{ Ом}$). При подачі на вхід перетворювача збуджуючої напруги $U = 1000 \text{ В}$, через перетворювач протікає достатньо великий струм, який відповідає великим значенням коливальних швидкостей. При цьому в активному матеріалі виникають знакозмінні динамічні напруження. Величина динамічних напружень (при існуючому відношенні власної f_0 і першої f_{p1} резонансних частот) складає близько $120 \cdot 10^5 \text{ Па}$ (при $W = 3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$). Оцінка отриманих значень динамічних напружень показує, що перетворювач має запас міцності по динамічній стійкості менше 2. Для забезпечення довготривалої працездатності перетворювача, п'єзокерамічні кільця необхідно армувати, створюючи стискаюче напруження в п'єзокераміці близько $360 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Як показує досвід виготовлення подібних перетворювачів, вказані напруження для армування реалізувати на практиці досить проблематично. В наш час, можливо реалізувати напруження, які становлять $(160 \cdot 10^5 - 180 \cdot 10^5) \text{ Па}$. Реалізація відбувається шляхом намотки на зовнішню поверхню п'єзокерамічного кільця – металічного дроту. Зменшення армуючих напружень приведе до зниження акустичної потужності перетворювача.

На робочих глибинах до 300 м, в п'єзокераміці перетворювача, виникають всебічні стискаючі напруження до $300 \cdot 10^5 \text{ Па}$, які не можуть викликати руйнування активних елементів і перетворювача в цілому.

3.4. Пластинчастий перетворювач зі згинними дисками

Аналіз вимог технічного завдання до низькочастотних пластинчастих перетворювачів і вибір підходів до їх теоретичного аналізу проведений з урахуванням досвіду розробки аналогічних конструкцій і можливості задоволення заданих вимог ТЗ.

Перетворювачі пластинчастого типу, які характеризуються серед низькочастотних перетворювачів мінімальними масо габаритними характеристиками, знайшли широке застосування в Україні і за її кордонами.

Найкращим зарубіжним аналогом з пластинчастих перетворювачів, є перетворювач *Model 246.07* [23] фірми *Edo Western corp.*, який являє собою пластинчастий перетворювач з резонансною частотою 700 Гц, не направлений в горизонтальній та вертикальній площині, з акустичною потужністю 75 Вт на основі п'єзокераміки ЕС-64, близької по параметрам до складу PZT-4, а також потужні перетворювачі зі згинними дисками, які входять до складу лінійної антени з акустичною потужністю 2кВт на резонансній частоті 800 Гц. [24].

З порівняльного аналізу даних по зарубіжним аналогам і вимогам ТЗ, можна зробити висновок про те, що лише деякі характеристики аналогів близькі до тих, що поставлені в технічному завданні.

У вказаних джерелах відсутній опис конструкцій, не приведені параметри, які слід забезпечити, зокрема, W_a / m , та ін. З огляду на це, для пластинчастого перетворювача, не можуть бути запозичені технічні рішення по конструктивному виконанню перетворювача. Відомості лише

підтверджують принципову можливість створення пластинчастих перетворювачів з деякими параметрами, близькими до необхідних.

Пластинчасті перетворювачі зі згинними дисками називаються також біморфними. Ця назва перетворювача точніше відображає його основну конструктивну особливість – наявність двох, міцно склеєних, дисків, які утворюють біморфну пластину. Форма коливань пластин на частоті основного резонансу, зазвичай використовується на практиці, спосіб її збудження показаний на рис. 8

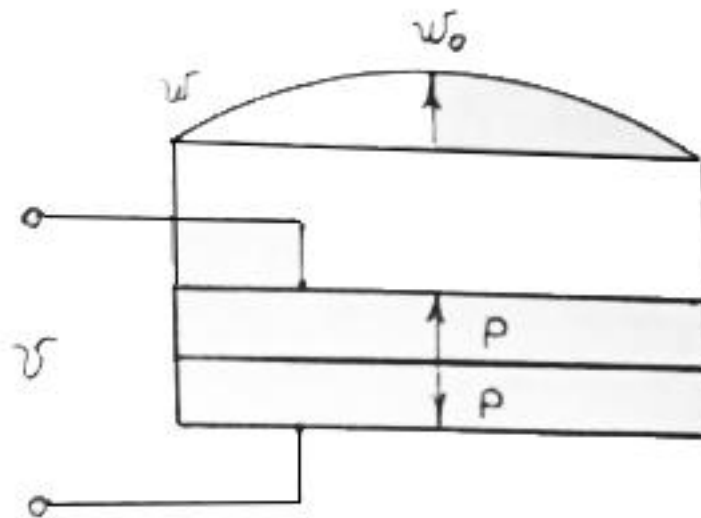


Рис. 8 Форма коливань пластин і спосіб її збудження

При збудженні дисків електричною напругою на основній частоті в них, в результаті зворотного п'єзоефекту збуджуються поперечні коливання, причому в силу власних особливості їх підключення (по змінному електричному полю і по полю поляризації) один з дисків стискається, інший розтягується, в результаті чого біморфна пластина згинається. Власна частота такої пластини пропорційна її товщині t і обернено пропорційна квадрату радіусу a . Відповідним підбором розмірів коливальної системи, тобто товщини і радіусу можна досягти досить малих хвильових розмірів біморфної пластини при достатньо низькій власній частоті - $2a = (0,1-0,3)\lambda$, що не вдається зробити для традиційних типів перетворювачів, які використовують повздовжні коливання. Перетворювач забезпечує все направлене

випромінювання, якщо проектується як монополь, у вигляді збалансованої коливальної системи з двох однакових біморфних пластин, симетрично закріплених в жорсткому корпусі. Умова закріплення біморфної пластини по контуру в корпусі визначає частоту і ефективність перетворення енергії, яка залежить від збуджуючої форми коливань. Найбільший інтерес представляють пластини шарнірно опертих по контуру. Вони дозволяють отримати найбільш низьку резонансу частоту і найбільшу ефективність електромеханічного перетворення енергії при однакових розмірах пластин. При цьому форма розподілення коливань по випромінюючій поверхні описуються косинусною функцією [25].

Нажаль, простота конфігурації коливальної системи пластинчастого перетворювача не спрощує проблеми його технічної реалізації. Зниження частоти основного резонансу пов'язане зі зменшенням відносної товщини біморфної пластини t/a , а значить, і зі зниженням її механічної міцності під дією гідростатичного тиску, оскільки величина механічних напружень, які виникають, обернено пропорційна $(t/a)^2$. При односторонньому навантаженні середовища на частину біморфа, утворююча випромінюючу поверхню, стискається під дією напружень (стискаючих), а нижня – розтягується. Дія напружень, що розтягують біморф, може зруйнувати крихку п'єзокераміку, навіть при невеликій глибині занурення, оскільки поріг статичної міцності на розтяг п'єзокераміки, зокрема, складу PZT-4, приблизно в 20 разів нижчий, ніж на стискання. Необхідність випромінювання достатнього рівня акустичної енергії, вимагає гарантій відповідної усталеної міцності, а значить, і вирішення проблеми забезпечення міцності п'єзокераміки у повному обсязі. Технічне вирішення цих проблем, як відомо, отримано при заміні одного з п'єзокерамічних дисків у складі біморфу – міцною підкладкою у вигляді металічної пластини, товщина якої вибирається таким чином, щоб нейтральна поверхня при коливання знаходились в підкладці [26].

У випадку створення низькочастотних пластинчастих перетворювачів традиційних конструкцій необхідно було б вирішити проблему промислового випуску п'єзокерамічних дисків з діаметром, який рівний 0,1λ і більше. В наш час, щоб уникнути цієї досить складної технологічної проблеми, запропоновано замінити пасивним матеріалом частину п'єзокераміки, яка знаходиться по краям коливальної системи, де механічні деформації незначні і тому вклад цієї частини п'єзокерамічної пластини в перетворення енергії – невеликий [18]. Матеріал, який буде використовуватись, може бути тим же металом, з якого виконана підкладка. Як встановлено при дослідженні шарнірно опертої пластини, радіус п'єзокерамічного диску може бути зменшений до 0,8 радіусу біморфної пластини без помітного погіршення енергетичних параметрів перетворювача [18].

Однак, для роботи на частоті нижче 1000 Гц, таке технічне рішення все ж не вирішує проблем виготовлення п'єзокерамічних дисків великого діаметру. Принципово можливий вихід з цієї ситуації – складання великогабаритних дисків з окремих сегментів [24]. Але для його практичної реалізації необхідне налагодження промислового випуску таких сегментів, що, очевидно, не доцільно.

Задовільним технічним рішенням при створенні низькочастотних п'єзокерамічних перетворювачів зі згинними дисками показана конструкція на рис. 9, яка має дві модифіковані біморфні пластини у вигляді мозаїчного набору п'єзокерамічних дисків 1, встановлених в отвори металічної підкладки 2 зі сторони випромінюючої поверхні і електрично з'єднаних - паралельно. Конструктивна реалізація закріплення біморфних пластин в жорсткому корпусі 3, забезпечує умови шарнірного обпирання. Перетворювач створює все направлене випромінювання, завдяки збалансованості симетричної коливальної системи при синфазному електричному збудженні біморфних пластин, які коливаються протифазно, відносно геометричного центру перетворювача.

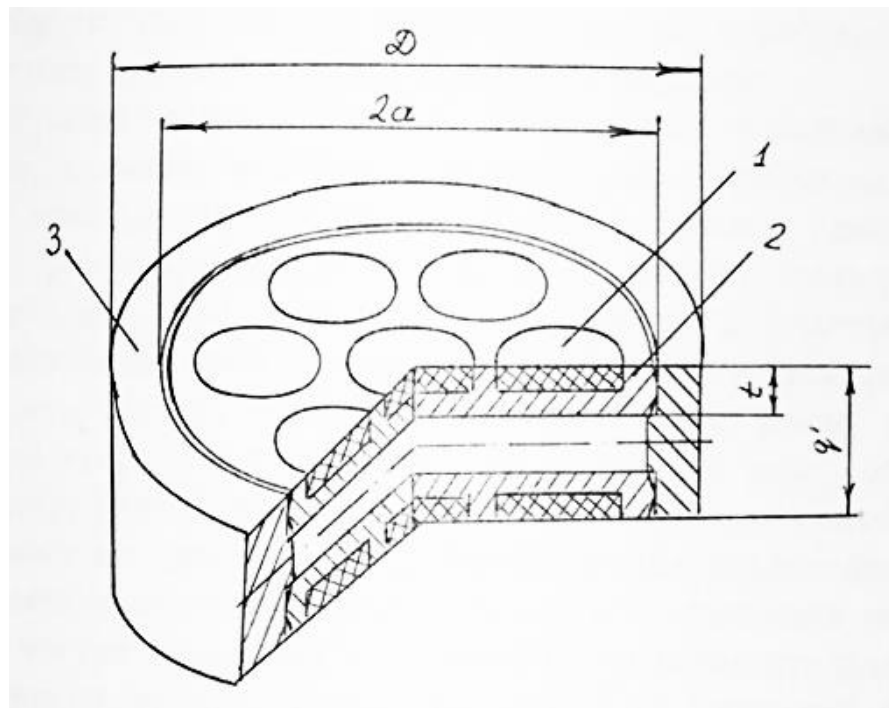


Рис.9 Схематичне зображення пластинчастого перетворювача

При роботі такого перетворювача на значних глибинах занурення в металічній підкладці, під дією гідростатичного тиску, виникають великі механічні напруження, тому вибір матеріалу для її виготовлення виконується перш за все з урахуванням характеристик міцності і обмежений високоміцними марками сталі і титану. Жорсткість корпусу перетворювача має бути достатньою, щоб не допустити його деформації при встановленні біморфних пластин. Для забезпечення стійкості корпусу до корозії, його виготовляють з титанових сплавів.

Дослідження пластинчастого перетворювача проводимо на основі універсальної еквівалентної електромеханічної схеми, зображеної на рис. 1 з використанням простого розрахункового апарату, який запропоновано в бібліографічному джерелі [2].

Основні припущення, прийняті при виборі моделі і враховуючі особливості структурної схеми побудови перетворювача, коротко можуть бути викладені наступним чином:

- коливальна система пластинчастого перетворювача двостороння, симетрична відносно площини, яка проходить через геометричний центр перетворювача, паралельної біморфним пластинам;
- умова закріплення біморфних пластин відповідає пружному закладенні, тобто кути повороту країв біморфних пластин пропорційні діючим в них моментам і при видаленні зовнішніх сил деформації – зникають. Практична реалізація такої умови закріплення, дозволила підтвердити, що відношення розрахованого значення частот резонансу вільної і експериментально виміряного значення частоти резонансу закріпленої біморфної пластини дорівнює $1,8 - 1,85$, що повністю відповідає цьому відношенню для випадку шарнірного закріплення;
- зміщення опор, виконаних у вигляді однієї деталі – корпусу, в напрямку, нормальному до площини пластин, не враховується, тобто корпус вважається абсолютно жорстким;
- конфігурація круглого пластинчастого перетворювача зі згинними дисками представлена при дослідженні його динамічної деформації циліндричної оболонки, яка закрита з торців біморфними пластинами і описується в циліндричній системі координат;
- біморфні пластини виконуються тонкими, що спрощує розрахунковий апарат. (Вплив інерції обертання поперечних перерізів і напружень здигу в пластинах кінцевої товщини доведеться врахувати, якщо не буде забезпечена умова $t/a \leq 0,2$);
- розгляд обмежений першою модою коливань пластин при апроксимації форми коливань, формою статичного прогину пластини під дією рівномірного навантаження;
- дослідження акустичного поля перетворювача виконано для моделі, яка наближено повторює обводи перетворювача сплюсненого сфероїду, поверхня якого співпадає з координатною поверхнею в сфероїдальній системі координат, яка допускає розділення змінних у хвильовому

рівнянні. Розподіл коливальної швидкості на поверхні перетворювача, у воді, прийнято таким же, як і у повітрі. Така модель, враховуюча кінцеву товщину перетворювача $q' = 2t + \tau$ дозволяє уникнути значних похибок, які мають місце в ряду випадків при використанні моделі перетворювача в акустичному полі, у вигляді плоскої пластини малої товщини, якою можна знехтувати.

Додатково, до вище вказаних допущень, прийнято також і припущення яке дозволяє врахувати неоднорідність верхнього шару біморфної пластини, створеного рівномірно розподіленими по чергово керамічними дисками у металі, цей шар можна розглядати як шар з однорідного матеріалу, який характеризується такими параметрами, як приведена густина ρ_{np} і модуль Юнга E_{np} . (Формули для розрахунку ρ_{np} і E_{np} а також параметрів, а також параметрів, які включають ці величини, показані в табл. 1.) В формулу для розрахунку коефіцієнта електромеханічної трансформації, окрім заміни в ній модуля Юнга п'єзокераміки E_k на E_{np} , слід ввести додатковий множник $(1 - \gamma)$, де γ - відносний об'єм металу в загальному об'ємі верхньої частини пластини [27].

Формули для розрахунку параметрів еквівалентної схеми перетворювача с двох шаровими біморфними пластинами, які електрично з'єднані паралельно, представлена в табл. 1, а електрофізичні параметри п'єзокераміки PZT-4, які використовуються в розрахунках, представлені нижче, в табл. 7. Формули для розрахунку напружень стискання в центрі п'єзокерамічного диску, мають вигляд:

$$\delta_k = \frac{P \cdot a^2 \cdot E_{31}^E \cdot Z_0}{16 \cdot (1 - \nu^2) D} (3 + \nu),$$

де P – гідростатичний тиск.

Результати експериментальних досліджень, відпрацьованих на підприємстві наближені до результатів розрахунків, які проведені по

запропонованій вище схемі. Це дає підстави для застосування її при розрахунку досліджуваного перетворювача на основі п'єзокераміки PZT-4.

Попередня оцінка можливості задоволення даним перетворювачем поставлених вимог в комплексі показала, що для пластинчастого перетворювача вони мають альтернативний характер: так, наприклад, збільшення відносної потужності W_a / m досягається за допомогою зменшення глибини занурення. Через неможливість задоволення всіх заданих вимог, в якості пріоритетного параметру обираємо глибину занурення, при умові забезпечення максимально можливого значення відносної потужності. В якості критерія, який обмежує даний параметр, обираємо гранично допустиме значення напружень стискання в п'єзокераміці $\delta_k \leq 1000 \cdot 10^5 \text{ Н / м}^2$, при якому, як представлено в [5], зміну параметрів перетворювача ще можна вважати допустимою.

Особливості обраної структурної схеми побудови перетворювача обумовлені заданими вимогами:

- для створення ненаправленого випромінювача, коливальна система має бути симетричною двосторонньою з ідентичними біморфними пластинами, включеними паралельно по змінному електричному полю і зустрічно по полю поляризації;
- діаметр $2a$ велико габаритних біморфних пластин визначається технологічними можливостями виробництва і при $2a > 200 \text{ мм}$ можлива реалізація біморфних пластин лише у вигляді мозаїчної конструкції, яка представлена на рис. 9. Така біморфна пластина складається з п'єзокерамічних дисків, які розміщені рівномірно по концентричним колам навколо центрального диску в отворах металічної підкладки і електрично збуджені синфазно.

Матеріали, використані в перетворювачі і доцільність їх використання обґрунтовані вище.

Геометричні параметри досліджуваного перетворювача наведені в

табл. 6.

Таблица 6

Найменування і позначення параметру, розмірність	Значення параметру	Примітка
Габарити біморфної пластини: <ul style="list-style-type: none"> діаметр $2a$, мм товщина t , мм 	384 28	
Габарити п'єзокерамічного диску: $\varnothing \times t$, мм	$\varnothing 66,5 \times 12$	Не до сріблення кромки по краю диску шириною в 3 мм
Кількість п'єзокерамічних дисків, шт.	19	Диски розміщені по двом концентричним колам
Габарити перетворювача: <ul style="list-style-type: none"> діаметр D , мм товщина $q' = 2t + \tau$, мм 	500 80	

Розрахункові значення параметрів еквівалентної схеми пластинчастого перетворювача наведені в табл. 7.

Таблица 7

Найменування і позначення параметру, розмірність	Розрахункове значення параметру	Примітка
Еквівалентна маса m_e , кг	15	$\rho_k = 7,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ $\rho_m = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Еквівалентна гнучкість C_e , м/Н	$2,78 \cdot 10^{-9}$	$Z_0 = 16,1 \text{ мм};$ $E_{31}^E = 0,76 \cdot 10^{11} \text{ Н / м}^2$ $E_m = 2,03 \cdot 10^{11} \text{ Н / м}^2$
Електрична ємність загальмованого перетворювача C_0^s , мКф	0,1	$\epsilon_{31} / \epsilon_0$
Опір електричних втрат $r_{\text{ел.втр}}$, кОм	90	$\text{tg } \delta = 0,03$
Динамічний коефіцієнт електромеханічної трансформації n_θ , Н/В	1,9	$k_\theta = 0,3$
Опір механічних втрат	3000	

$r_{м.втр} , Н \cdot с / м$		
Активна складова імпедансу випромінювання $r_s , Н \cdot с / м$	10400	$k\alpha = 0,49;$ $\alpha = 0,03$
Реактивна складова імпедансу випромінювання $x_s , Н \cdot с / м$	38000	$\beta = 0,11$

Вихідні параметри перетворювачів представлені в табл. 8.

Таблиця 8

Найменування і позначення параметру, розмірність	Розрахункове значення параметру	Примітка
Частота резонансу у повітрі $f_0 , Гц$	780	
Частота резонансу у воді $f_p , Гц$	600	$m_s = 5,25$
Електроакустичний ККД $\iota_{e/a}$	0,25	Прийнято з експерименту
Активна складова електричного імпедансу $R_w , Ом$	3600	
Ширина смуги пропускання частот $\Delta f , Гц$	85	
Електрична напруга $U , В$	2400	
Акустична потужність $W_a , Вт$	400	При $\iota_{e/a} = 0,25$
Нерівномірність х-ки направленості $\xi , дБ$	$< \pm 0,2$	
Чутливість в режимі випромінювання $\beta_U , Па \cdot м / В$	2,8	При $\iota_{e/a} = 0,25$ $\Omega = 1$

Порівняння приведених в таблиці 8 розрахованих параметрів із заданими в ТЗ, показує, що пластинчасті перетворювачі на згинних дисках, які можуть бути реалізовані на практиці, не забезпечують весь комплекс цих вимог. Так вимогу до частоти резонансу ($f_p = 600$ Гц), направленості (нерівномірність $X.H \leq \pm 2дБ$), робочої глибини, задовольняються не в повному обсязі, але за рахунок зниження значень потужності і ширини смуги пропускання частот.

Ріст ефективності і розширення смуги пропускання частот досягається за рахунок підвищення навантаження на перетворювач шляхом збільшення біморфної пластини. Однак, як показує практика, виготовлення пластинчастого перетворювача з частотою $f_p = 600$ Гц для глибини $H=300$ м з діаметром біморфної пластини $2a > 400$ мм, викликає технологічні труднощі. Підвищення навантаження на перетворювачі спостерігається при використанні їх в антені, яка виконана у вигляді лінійної еквідистантної решітки: ККД по тиску збільшується до 0,5, а смуга пропускання частот збільшується в 1,5 – 2 рази, що означає задоволення даних вимог на практиці.

Робоча глибина перетворювача обмежена гранично допустимими значеннями механічних напружень стискання, які виникають в зовнішньому шарі п'єзокерамічних дисків під дією гідростатичного тиску, $\delta_{сж} = (900-1000) \cdot 10^5 \text{ Н / м}^2$ (з коефіцієнтом запасу статичної міцності $k_s = 3$), при яких втрати значення п'єзомодуля d_{31} складають $\sim 10\%$ (на основі експериментальних даних).

Вказаному значенню електричної напруги в п'єзокераміці відповідає динамічне напруження $\delta_o = 100 \cdot 10^5 \text{ Н / м}^2$ (при питомій акустичній потужності $W_{по} = 0,35 \cdot 10^4 \text{ Вт / м}^2$), яке є допустимим. При цьому стискаючі статичні напруження в нижньому шарі п'єзокерамічних дисків буде складати $400 \cdot 10^5 \text{ Н / м}^2$, тобто довготривала статична міцність може бути забезпечена.

Електрична напруга відповідає напруженості електричного поля в п'єзокераміці $E = 2 \cdot 10^5 \text{ В / м}$, тобто менша ніж гранично допустиме значення $E_{дон} = 3 \cdot 10^5 \text{ В / м}$.

Подальше збільшення електричної напруги обмежено як величиною динамічних напружень, так і електричною міцністю конструкції.

Таким чином неможливість задовольнити технічні вимоги у відношенні параметру W_a / m , значення якого для досліджуваного перетворювача складає 5 Вт/кг, (в антені можливе збільшення до 10 Вт/кг) обумовлена, в основному, конструктивними особливостями коливальної системи перетворювання

енергії через використання поперечного п'єзоефекту и, також, через слабкого узгодження з робочим середовищем, через малі хвильові розміри $2a \approx 0,15\lambda$).

3.5. Стержньовий грибоподібний перетворювач

При виборі стержньового перетворювача в якості головної вимоги ТЗ розглядалась можливість забезпечення необхідної величини акустичної потужності, віднесеної до маси перетворювача $W_a / m = 25 \text{ Вт} / \text{кг}$, на частоті 600 Гц, при відносній смузі частот 30%.

Із вітчизняних джерел [2], відомо, що в наш час не виникають складнощі проектування стержньових перетворювачів з резонансними частотами не нижче 2000 Гц. При подальшому зниженні резонансної частоти маса стержньових перетворювачів зростає пропорційно до 3-го ступеня відношення частот, і, як наслідок, виникає багато технологічних проблем, в тому числі, проблема виготовлення велико габаритних п'єзоелементів (на практиці вдавалось виготовляти п'єзоелементи діаметром до 100мм). Тому для низьких резонансних частот, реальним, є створення перетворювача зі зменшеними розмірами фронтальних накладок (значно менше $0,5\lambda$). Маса габаритні характеристики таких перетворювачів можуть виявитись прийнятними з позиції комплектування багатоелементних антен, але взаємний вплив сусідніх перетворювачів по акустичному полю у складі антени – підсилюється, що приводить до погіршення їх електроакустичних параметрів.

Відповідно до відпрацьованої методології, проектування сучасних стержньових гідроакустичних перетворювачів, для діапазону середніх звукових частот, являє собою трисекційну коливальну систему із середньою секцією з активного п'єзокерамічного елементу – п'єзоблоку, жорстко з'єднаного з накладками із пасивного металу (зазвичай з металів) з обох боків від нього. Введення в коливальну систему електромеханічних пасивних елементів з більшим механічним імпедансом ($\rho c S$), ніж у п'єзокерамічного елементу, дозволяє значно знизити резонансний розмір перетворювача в порівнянні з на пів хвильовим стержнем, повністю складеним з п'єзокераміки [28].

Переважне використання стержньових перетворювачів в наш час отримали у складі багатoeлементних антен, частіше, циліндричної форми. Необхідність розміщення кожного перетворювача в рамках відведеного для його монтажу в антену об'ємного сектору, визначила “грибоподібну” специфіку конфігурації коливальної системи (рис. 10): поперечний розмір фронтальної (випромінюючої) накладки 1 значно перевищує цей розмір у п'єзокерамічного пакету 2 і тильної накладки 3.

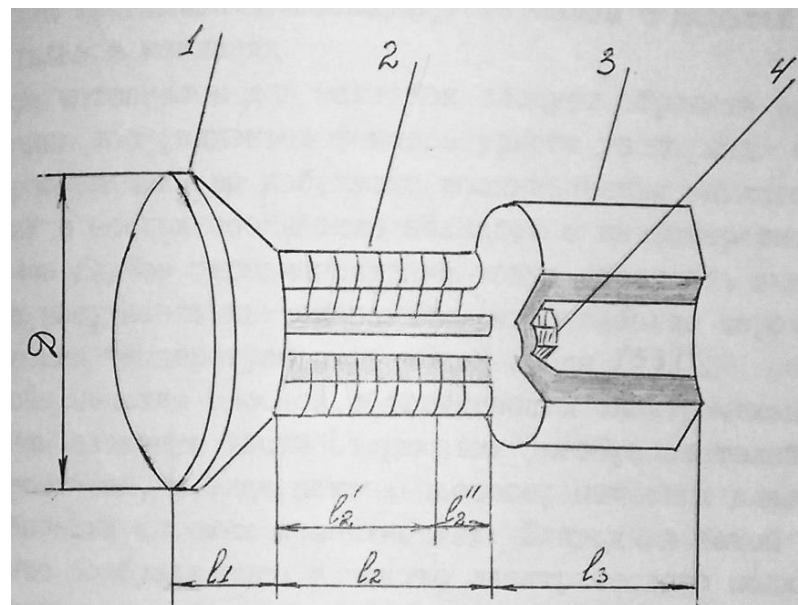


Рис.10. Схематичне зображення коливальної системи стержньового грибоподібного перетворювача.

З результатів теоретичних та експериментальних досліджень відомо, що максимальна ефективність перетворення електричної енергії в акустичну залежить від вибору відношення геометричних розмірів елементів коливальної системи. Для виключення впливу згину фронтальної накладки на роботу перетворювача (якщо частота коливань накладки близька до резонансної частоти перетворювача, то його смуга пропускання частот збільшується, але при цьому зменшується чутливість випромінювання) її резонансна частота має бути значно вище частоти основного резонансу перетворювача. Частота згину накладки орієнтовно зворотно пропорційна відношенню D/t , де D - діаметр, t - товщина накладки. Товщина фронтальної накладки обирається з умови $t \geq 0,2D$. При оптимальному

проектуванні стержньових перетворювачів рекомендується вибирати відношення площ поперечних перерізів фронтальної накладки S_1 і п'єзокерамічного пакету S_2 рівним приблизно 10, а величину коефіцієнту асиметрії $p = l_2' / l_2$ (рис.10) рівною приблизно 0,7 при довжині п'єзокерамічного пакету $l_2 / \lambda_k = 0,1$, де λ_k - довжина хвилі а п'єзокераміці на частоті основного резонансу. Вказане значення коефіцієнту асиметрії досягається за рахунок різниці площ поперечних перерізів накладок і п'єзокерамічного блоку, а також за рахунок використання для фронтальної накладки матеріалів з меншою густиною, ніж для тильної накладки.

При виборі матеріалів для накладок, слід звертати увагу на узгодження коефіцієнтів температурного розширення цих матеріалів і п'єзокераміки, щоб уникнути механічних напружень в місцях з'єднання накладок з п'єзокерамічним пакетом. В протилежному випадку термічні напруження можуть досягати значень, які приведуть до руйнування п'єзокераміки, що ймовірноше при різкій зміні температури оточуючого середовища [29].

Для забезпечення високої ефективності електромеханічного перетворювання, активну частину стержневих перетворювачів виконують секційною, у вигляді пакету п'єзокерамічних пластин з електродами на великих плоских поверхнях. Завдяки такій структурі напрямок збуджуючого, в пакеті, електричного поля співпадає з напрямком коливань і перетворювання енергії протікає при дії повздовжнього п'єзомодуля, який в декілька разів перевищує поперечний п'єзомодуль.

Секціонування п'єзокераміки дозволяє також спростити процес виготовлення п'єзоелементів за рахунок зниження величини електричної напруги при поляризації відносно тонких пластин замість довгих суцільних стержнів і, окрім того, дозволяє знизити ємнісну складову імпедансу перетворювача.

При повздовжніх коливаннях з великою амплітудою, п'єзокераміку зміцнюють шляхом створення попереднього стиснення, яке переважає по

величині динамічне напруження, це роблять для того, щоб уникнути руйнування крихкої кераміки в на пів періоді дії напружень, що її розтягують.

Армування п'єзокераміки виконують за допомогою болта 4 (рис.10) який проходить через центральні отвори п'єзоелементів, з високою межею міцності на розтягнення.

Коливальна система складеного стержньового перетворювача, який має масивні накладки, може бути описана за допомогою еквівалентної схеми з зосередженими параметрами [2].

Межа застосування розрахункової моделі коливальної системи складеного стержньового перетворювача визначається наступними допущеннями:

- трьох компонентний перетворювач представлений у вигляді тонкого складеного стержня з поперечними перерізами, які залишаються плоскими при коливаннях;
- довжини частин, з яких складається стержень менші по відношенню до довжини пружної хвилі в них.

Така одновимірна механічна система виконує тільки поршневі коливання вздовж, в ній відсутні поперечні складові механічних і електричних величин. Напруженість електричного поля характеризується повздовжньою складовою E_{33} , яка дорівнює напруженості поля між електродами одного елементу.

Акустичне поле стержньового перетворювача розглядається в умовах його повного узгодження з середовищем (безрозмірний коефіцієнт при активній складовій імпедансу випромінювання $\alpha = 1$), яке забезпечується розташуванням перетворювача в плоскій антені великих хвильових розмірів, оскільки розмір випромінюючої накладки низькочастотного перетворювача, який можна реалізувати на практиці менше $0,5\lambda$.

Описані допущення значно спрощують математичний апарат для дослідження стержньових грибоподібних перетворювачів. Як підтверджується досвідом проектування, дана модель коливальної системи

достатньо коректна для опису роботи перетворювача поблизу і нижче основної резонансної частоти, тобто в частотному діапазоні, де форма коливань механічної системи залишається близькою до характерної для основного резонансу.

Для теоретичного аналізу стержньового перетворювача з частотою $f_p = 600 \text{ Гц}$ на основі зарубіжної п'єзокераміки складу PZT-4 використана схема розрахунку параметрів еквівалентної схеми, яка була викладена в розд. 2.

Геометрія стержньового перетворювача визначається виходячи з частотного рівняння

$$\frac{Z_1 \operatorname{tg} t_1 + Z_2 \operatorname{tg} t_2 + Z_3 \operatorname{tg} t_3}{\frac{Z_1 Z_3}{Z_2} \operatorname{tg} t_1 \cdot \operatorname{tg} t_2 \cdot \operatorname{tg} t_3} = 1,$$

де Z - механічний опір: $Z = \rho c S$;

t - довжина хвилі: $t = kl = \frac{\omega}{c} l$;

ρ, c, S, l - відповідно густина, швидкість звуку, площа поперечного перерізу, довжина компонентів коливальної системи.

Числові індекси 1,2,3 відносяться відповідно до випромінюючої накладки, п'єзокерамічному пакету і до тильної накладки.

Вибір геометричних співвідношень матеріалів коливальної системи стержньового перетворювача виконано з урахуванням рекомендацій по оптимальному проектуванню, а саме:

- 1) з метою зменшення масо габаритних характеристик перетворювача, розмір випромінюючої поверхні вибраний $\lambda / 4 \times \lambda / 4$;
- 2) для досягнення потрібної смуги пропускання частот і максимізації акустичної потужності з поверхні випромінюючої накладки, її матеріал вибраний більш легший (титановий сплав) по відношенню до матеріалу тильної накладки (сталь); відношення площ поперечних перерізів випромінюючої накладки і п'єзокерамічного пакету $S_1 / S_2 = 11,5$, а

відношення мас накладок вибране таким, щоб забезпечити коефіцієнт асиметрії $P = 0,6$;

товщина випромінюючої накладки рівна $0,4$ лінійного розміру її поверхні, щоб виключити вплив згину;

3) для забезпечення більшої механічної міцності:

а) зменшений об'єм крихкої кераміки, яка розміщується в центрі перетворювача, де виникають найбільші механічні напруження:

довжина п'єзокерамічного пакету вибрана рівною $l_2 = 0,1\lambda_k$;

б) створене попереднє зміцнення перетворювача, за рахунок армуючої стяжки;

конфігурація п'єзоелементів вибрана у вигляді шайб з отворами, достатніми для розміщення в них армуючої стяжки.

Пакет п'єзоелементів складається з 36 п'єзокерамічних шайб, електрично з'єднаних паралельно, двох ізоляторів і двох термічно розв'язуючих прокладок з нікель – коливальної сталі з обох боків від п'єзоблоку.

Масо габаритні характеристики перетворювача представлені в табл. 9.

Згідно орієнтовної оцінки, маса конструктивно оформленого перетворювача може збільшитись до 40% і складе, з елементами герметизації, екранами і кабельним введенням, близько $m_{\Sigma} = 1300 \text{ кг}$.

Таблиця 9

Параметри коливальної системи	Параметри складових частин коливальної системи		
	Випромінююча накладка	П'єзокерамічний пакет	Тильна накладка
Габарити: <ul style="list-style-type: none"> по випромінюючій накладці $(625 \times 625) \text{ мм}$ по довжині $L = 1580 \text{ мм}$ 	Діаметр зі сторони п'єзокерамічного пакету $d_1 = 400 \text{ мм}$ Довжина $l_1 = 250 \text{ мм}$	Розмір п'єзокерамічної шайби $d_n \times d_{\text{вн}} \times \Delta = (240 \times 120 \times 100) \text{ мм}$ Довжина	Діаметр $d_3 = 340 \text{ мм}$ Довжина $l_3 = 900 \text{ мм}$

		$l_2 = 430 \text{ мм}$ $l_2' = 260 \text{ мм}$ $l_2'' = 170 \text{ мм}$	
Маса:	<ul style="list-style-type: none"> $m = 940 \text{ кг}$ 		

В табл. 10 зведені розрахункові значення параметрів еквівалентної схеми параметрів стержньового перетворювача з частотою резонансу $f_p = 600 \text{ Гц}$ для зарубіжного складу PZT-4, які отримані з використанням формул, приведених в табл. 1.

Таблиця 10

Назва і позначення параметру, розмірність	Розрахункове значення для складу PZT-4	Примітки
Еквівалентна маса $m_e, \text{кг}$	500	$\rho_1 = 4,5 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^2$ $\rho_2 = 7,5 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^2$ $\rho_3 = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^2$
Еквівалентна гнучкість $C_e, \text{м} / \text{Н}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$E_1 = 1,107 \cdot 10^{11} \text{ Н} / \text{м}^2$ $E_2 = 0,507 \cdot 10^{11} \text{ Н} / \text{м}^2$ $E_3 = 2,0 \cdot 10^{11} \text{ Н} / \text{м}^2$
Електрична ємність загальмованого перетворювача $C_0^S, \text{мкФ}$	1,14	$C_0^T = 1,4$
Опір електричних втрат $r_{ел.втр}, \text{кОм}$	4,7	$\text{tg} \delta = 0,04$
Динамічний коефіцієнт електромеханічної трансформації $n_o, \text{Н} / \text{В}$	80	$d_{33} = 260 \cdot 10^{-12} \text{ К} / \text{Н}$
Опір механічних втрат $r_{м.втр}, \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}$	$7,5 \cdot 10^3$	Добротність перетворювача в повітрі $Q_{м.втр} = 25$
Активна складова імпедансу випромінювання $r_s, \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}$	$585 \cdot 10^3$	$\alpha = 1$
Частота резонансу в повітрі, $f_0, \text{Гц}$	600	
Частота резонансу у воді, $f_p, \text{Гц}$	600	$\beta = 0$

Електроакустичний ККД, ι_{ea}	0,45	З урахуванням екс. даних
Активна складова електричного імпедансу перетворювача на резонансній частоті $R_{ex}, Ом$	100	
Ширина смуги пропускання частот $\Delta f, Гц$	200	
Акустична потужність $W_a, Вт$ при електричній напрузі $U = 2700 В$	$32 \cdot 10^3$	
Чутливість в режимі випромінювання по напрузі $\beta_U, Па \cdot м / В$	23	

Значенню електричної напруги, що подається на вхід, відповідає динамічне механічне напруження, що виникає у вузловій площині п'єзокерамічного блоку, і складає 32,5 МПа. При цьому питома акустична потужність складає $W_{mn} = 8,3 \cdot 10^4 Вт / м^2$, а амплітуда зміщень випромінюючої накладки $\xi = 62,5 мм$.

Для забезпечення роботи перетворювача в околі напружень стиснень, в п'єзокерамічному блоці необхідно створити напруження армування величиною 38 МПа.

Для практичної реалізації низькочастотного стержньового перетворювача, побудованого на зарубіжній кераміці PZT-4, необхідно вирішувати такі ж технічні проблеми, що і для вітчизняних перетворювачів, а саме:

- 1) відпрацювання технологічних процесів збірки і конструктивного оформлення великогабаритних п'єзокерамічних блоків;
- 2) вирішення питання технології виготовлення великогабаритних деталей та вузлів з металу;

- 3) створення нової технології армування великогабаритних стержньових перетворювачів із зусиллям стиснення 135 тон і матеріальної бази для її забезпечення.

Результати досліджень стержньового перетворювача на основі зарубіжної п'єзокераміки PZT-4 показали, що вимоги ТЗ можуть бути задоволені в повній мірі, якщо вдасться вирішити практичні питання, пов'язані з промисловим виготовленням таких великогабаритних перетворювачів.

4. Порівняльна оцінка результатів виконаних розрахунків з розрахунками для п'єзокераміки складу ЦТБС-3.

У відповідності з ТЗ, отримані результати теоретичного аналізу низькочастотних перетворювачів на основі п'єзокераміки PZT-4 з резонансною частотою $f_p = 600 \text{ Гц}$ підлягають порівняльній оцінці з аналогічними матеріалами, на основі п'єзокераміки ЦТБС-3. Для забезпечення наочності, основні параметри перетворювачів, які відповідають обом випадкам, будуть внесені в табл. 11, зліва в таблиці будуть результати для кераміки PZT-4, а з права, відповідно, результати для п'єзокераміки ЦТБС-3.

Як і передбачалося, при попередній оцінці в підрозділі 3.1, використання зарубіжної п'єзокераміки не привело до отримання кардинально різних результатів. Для всіх типів перетворювачів (за виключенням пластинчастого перетворювача з мінімальною масою) спостерігається зменшення маси на (12-20) %, що пояснюється деяким зменшенням габаритів перетворювачів, за рахунок нижчої швидкості звуку в п'єзокераміці PZT-4. Але такий параметр, як відносна акустична потужність помітно підвищився лише у пластинчастого перетворювача (в 2,75 рази) і у повздовжньо – згинного (на 28%), а ширина смуги пропускання зменшилась практично у всіх перетворювачів.

Залежність зміни електроакустичних параметрів від активного матеріалу, звісно, проявляється по-різному і визначається як типом перетворювача, так і вихідними параметрами при розробці. Доцільно проаналізувати ці залежності для кожного типу перетворювача окремо.

Вдалось не тільки знизити габаритний резонансний розмір перетворювача вздовж більшої осі еліпсоподібної оболонки, а і зменшити на 10% товщину оболонки. Таким чином вдалось отримати суттєвішу по відношенню до інших типів перетворювачів перевагу по масі без зміни типорозміру п'єзоелементу, оскільки в даному перетворювачі основна резонансна частота визначається не активною геометрією блока, як у

Параметри і обмежуючі фактори PZT-4 / ЦТБС-3	Тип перетворювача			Таблиця 11
	Повздожньо-згинний	З вільно обтічними кільцями	Зі згинними дисками	Стержньовий грибоподібний
Габарити: мм λ	$2a \times 2b \times H$ 530×148×1200 / 560×162×1200 0,21×0,065×0,46 / 0,22×0,065×0,48	$D_{зовн} \times H$ 774×530 / 774×630 0,31×0,224 / 0,31×0,25	$D \times q'$ 500×80 0,2×0,032	$A \times A \times L$ (625×625)×1550 / (625×625)×1730 (0,25×0,25)×0,632 / (0,25×0,25)×0,7
Маса, кг	475 / 600	385 / 435	80	1300 / 1500
Електроакустичний ККД	0,6	0,61 / 0,64	0,25 / 0,23	0,45
Максимальна акустична потужність, Вт	$13,55 \cdot 10^3$ / $13,55 \cdot 10^3$	$10,0 \cdot 10^3$ / $17,3 \cdot 10^3$	400 / 144	$32 \cdot 10^3$ / $38 \cdot 10^3$
Електрична напруга, В	2000	600 / 1000	2400 / 1200	2700 / 1900
Відносна акустична потужність, Вт/кг	28,5 / 22	26 / 40	5 / 1,8	25
Ширина смуги пропускання частот, Гц	90-120 / 150-200	50 / 60	85 / 100	200 / 180-200
Нерівномірність направленості, дБ	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 1$ в поперечній площині	$\leq \pm 0,2$	—
Робоча глибина, м	300 / 400 – 600 силова / компенсована констр.	Не обмежена	300	400-600

циліндричного перетворювача, а складною геометрією коливальної системи, яка включає окрім п'єзокерамічного пакету металічну оболонку. Через зменшення габаритів перетворювача його навантаження погіршилось (зменшився безрозмірний коефіцієнт α), тобто знизився опір випромінювання, але через зменшення динамічного коефіцієнту електромеханічної трансформації (в основному, через більш низьку діелектричну проникність п'єзокераміки складу PZT-4, ніж ЦТБС-3), активна складова електричного імпедансу перетворювача мало змінилась і тому акустична потужність залишилась майже не змінною при тій же електричній напрузі на вході. Але завдяки зменшенню маси перетворювача, відносна акустична потужність W_a / m збільшилась майже на 30 %. Наслідком зниження опору випромінювання і опору механічних втрат (останнього за рахунок значно більш високої механічної добротності складу PZT-4 в порівнянні з ЦТБС-3) стало помітне зниження смуги пропускання перетворювача (приблизно на 50 %). Однак для великогабаритних низькочастотних перетворювачів очевидно, що вигаиш від зниження маси на 30% більш ефективний, ніж зменшення смуги пропускання на 50%. В даному випадку при виборі технічних рішень, пріоритет був поставлений на можливість продемонструвати переваги перетворювача, які можуть виявитись принципово важливими, оскільки повздовжньо – згинний перетворювач, очевидно, являється самим низькочастотним серед потужних п'єзокерамічних перетворювачів. Значне зниження маси перетворювача зумовлено, окрім зменшень геометричних параметрів, можливістю забезпечити ефективну роботу перетворювача на заданій глибині 300 м при виконанні його у вигляді силової конструкції, тобто без використання елементів, які акустично розвантажують внутрішню водозаповнену порожнину перетворювача. Принципова можливість збільшення робочої глибини повздовжньо – згинного перетворювача при використанні п'єзокераміки PZT-4 зумовлена слабою і до того ж прямо пропорційною, на відміну від ЦТБС-3, залежністю п'єзомодуля

d_{33} від стискаючого напруження, прикладеного вздовж осі поляризації (в даному випадку від зусилля армування). Ця перевага зарубіжної п'єзокераміки складу PZT-4 виявилась найголовнішою для масо габаритних і електроакустичних параметрів перетворювача повздовжньо – згинного типу.

На відміну від повздовжньо – згинного, циліндричний перетворювач з вільно обтічними кільцями виконаний з тим же поперечним розміром (в даному випадку – діаметром), що і спроектований раніше перетворювача на основі п'єзокераміки ЦТБС-3. За рахунок більш низької швидкості звуку у складі PZT-4 резонансний розмір – висота перетворювача, зменшився на 10 %, а маса – на 12 %. Однак через вихідної прив'язки до відомих поперечних розмірів (тобто до елементної бази з типорозмірами, які освоєні вітчизняним виробництвом) відбулось відхилення від оптимального відношення між поперечним і повздовжнім розмірами перетворювача, в наслідок чого – неузгодженість перетворювача з робочим середовищем, яка проявилась в падінні коефіцієнту випромінювання в 2,7 рази. При цьому, хоч коефіцієнт електромеханічного зв'язку впав на 22 %, активна складова електричного імпедансу виявилась нижче в 2 рази, тобто потенціальна можливість випромінювання акустичної потужності при такій же електричній напрузі $U=1000$ В, що і у випадку зі складом ЦТБС-3, також збільшилась в 2 рази. Але потенціальні можливості, як і у випадку для вітчизняної п'єзокераміки не можуть бути використані. Для ЦТБС-3, це пов'язано з динамічною утомною міцністю армованого перетворювача. В даному випадку, фактором, який впливає на обмеження для кераміки PZT-4, є перш за все неможливість за армувати перетворювач зусиллям, яке відповідає динамічним напруженням, що виникають при великих значеннях споживаної електричної потужності. На практиці, розробленим перетворювачем можна випромінювати потужність в 1,73 рази меншу, ніж вітчизняним перетворювачем, правда, при такому ж зниженні електричної напруги. Тому відносна акустична потужність

перетворювача на основі п'єзокераміки PZT-4 в 1,5 рази нижча, чим на основі кераміки ЦТБС-3, хоча згідно ТЗ, вимог до даної величини вказано не було.

Очевидні переваги використання кераміки PZT-4 проявляються при розробці пластинчастого перетворювача зі згинними дисками: при збереженні габаритів і маси перетворювача, в межах відомих значень, відносна акустична потужність W_a/m збільшилась в 2,75 рази, правда, при зменшенні смуги пропускання частот на 15 % і підвищенні електричної напруги вдвічі. Останнє реально для п'єзокераміки PZT-4, яка не деполяризується [30] при рівні електричної напруги в 2,5 рази більшої ніж встановлена для ЦТБС-3.

Для стержньового грибоподібного перетворювача перехід від п'єзокераміки ЦТБС-3 до PZT-4 не приніс значних змін: через зріст активної складової електричного опору більш ніж в 2 рази, довелось в 1,4 рази збільшити електричну напругу живлення, щоб забезпечити збереження заданого рівня відносної потужності $W_a/m=25$ при тому, що маса перетворювача за рахунок зменшення довжини його коливальної системи на 11 % знизилась на 200 кг.

В результаті виконання порівняльної оцінки розрахункових параметрів всіх чотирьох п'єзокерамічних перетворювачів з основною резонансною частотою 600 Гц на основі п'єзокераміки ЦТБС-3 і зарубіжної PZT-4 можна зробити наступні висновки.

1. Використання переваг зарубіжної кераміки для отримання більш високих енергетичних показників, можливе при умові покращення технології виробництва перетворювачів: зокрема, стосовно циліндричного перетворювача необхідні нові конструкторсько – технологічні рішення, які б забезпечили більш високі рівні армованого напруження; стосовно пластинчастого перетворювача – підвищення електричної міцності конструкції в цілому.
2. Можливість зниження масо габаритних характеристик частотних перетворювачів до 20 % за рахунок більш низької швидкості звуку в

п'єзокераміці PZT-4 доцільно взяти до уваги стосовно застосування до низькочастотних масивних циліндричних і повздовжньо – згинних перетворювачів.

3. Безумовно переваги повздовжньо – згинних перетворювачів силової конструкції на основі кераміки PZT-4 на відміну від ЦТБС-3 проявляються за рахунок прямо пропорційної слабкої залежності повздовжнього п'єзомодуля від армуючих зусиль: робоча глибина може бути збільшена майже вдвічі при зниженні маси перетворювача на (10-15) %.

Стартап-проект

Таблиця 12. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Теоретичний розрахунок і порівняльна оцінка параметрів перетворювачів для вибору найбільш конкуренто спроможного на ринку	Застосування у воєнній промисловості	Достатньо невеликі масо габаритні параметри, необмежена глибина занурення, за рахунок компенсованої конструкції, можливість випромінювання сигналів в більш широкій смузі частот в порівнянні з одно резонансними системами

Таблиця 13. Визначення сильних, слабких та нейтральних х-тик ідеї проекту

№ п/п	Техніко економічні характеристики ідеї	Потенційні товари			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2			
1	Покупці; Постачальники; Фірми, що можуть проникнути в галузь	Циліндричний компенсований	Пластинчастий перетворювач	Стержневий перетворювач	У внутр. порожнині може виникати рання кавітація, через $P_{внутр.} > P_{зовн.}$	Нерівномірність Х.Н.	Необмежена глибина занурення, широка смуга частот, висока потужність.

Таблиця 14. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології і реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
	Налагодження процесу	Технології розроблені на	Наявні, можливо для зменшення	Дані технології не доступні рядовому

1	виготовлення п'єзокерамічних перетворювачів циліндричного типу	науково дослідницьких військових підприємствах	масо габаритних параметрів, вони потребують доопрацювання	громадянину України. Використовуються для виготовлення у військовій промисловості та засекречені
---	--	--	---	--

Таблиця 15. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	≈ 10000000/рік
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Спадає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Знання, отримання дозволу на виготовлення, мала кількість молодих спеціалістів
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандартизація та контроль вимірювального обладнання
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	≈ 3,57%

Таблиця 16. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба виготовлення приладів ехолокації	Військово-морські сили України, та країн Європи	Технічні завдання, стандарти, унікальність технології, впровадження	До постачальника: забезпечити вчасне та безперервне постачання кераміки та інших матеріалів для виготовлення.

			нового функціоналу	До продукції: максимальна якість та точність виробництва, виконання гарантійних обов'язків
--	--	--	--------------------	--

Таблиця 17. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Фінансування	Мала кількість кваліфікованих кадрів, недостатнє фінансування	Скорочення робочих місць, зменшення кількості та якості моделей, що виробляються

Таблиця 18. SWOT – аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: продукт, на який завжди буде попит	Слабкі сторони: вузькоспеціалізований проект
Можливості: вихід на світовий ринок, при достатньому фінансуванні	Загрози: малий притік кваліфікованих кадрів, малий прибуток на початку розробки

Таблиця 19. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
-------	--	--	---	----------------------------------

1	Проект не новий для світового ринку	Компанія буде конкуренто спроможною за рахунок інновацій і високої оплати праці	Х-тики товару будуть залежати від ТЗ замовника	Стратегія диференціації
---	-------------------------------------	---	--	-------------------------

Звісно, дана тематика вузько спеціалізована, але надзвичайно важлива для України, так як використовується в військовій промисловості. Також у зв'язку з малою кількістю підприємств, які цим займаються, конкуренція на ринку не дуже велика. Щодо масо габаритних розмірів самої моделі таких перетворювачів і трати великої кількості коштів на створення прототипів, в наш час є різноманітні пакети програм, які за допомогою чисельних методів можуть допомогти побудувати такі макети і розв'язати задачу не тільки в ближньому полі. Однією з таких програм є ПЗ Comsol.

Висновок

В результаті виконання роботи проведений теоретичний аналіз чотирьох типів низькочастотних перетворювачів: повздовжньо – згинного, циліндричного з вільно обтічними кільцями, пластинчастого зі згинними дисками і стержньового грибоподібного.

Перетворювачі досліджені в умовах максимально можливого їх акустичного навантаження з урахуванням практичної можливості реалізації таких умов.

Показано, що повздовжньо – згинний і циліндричний перетворювачі на основі кераміки PZT-4 задовольняють заданим вимогам на частоті основного резонансу $f_p = 600 \text{ Гц}$ по енергетичним (ККД не менше 0,5) масо габаритним характеристикам (акустична потужність по відношенню до маси не менше 25) і властивостям направленості (нерівномірність Х.Н. в поперечній і повздовжній площині: у повздовжньо – згинного перетворювача не більше $\pm 2 \text{ дБ}$, у циліндричного, в поперечній площині менше $\pm 1 \text{ дБ}$), робоча глибина силової конструкції повздовжньо – згинного перетворювача 300 м, циліндричного – необмежена, так як конструкція компенсована, однак смуга пропускання частот цих перетворювачів відповідно в 2 і в 4 рази вужча заданої.

Стержньовий перетворювач, розглянутий у складі нескінченної стержньової решітки без акустичних щілей (для створення максимально можливого навантаження робочим середовищем при зменшених до $0,25\lambda$ розмірах випромінюючої накладки з ціллю зниження масо габаритних характеристик), задовольняє поставлені вимоги (за виключенням вимог до все направленості), але можливість його реалізації на практиці не проста.

Як і передбачалось раніше, не задовольняє вимог ТЗ по відносній акустичній потужності W_a / m пластинчастий перетворювач, хоча цей параметр за рахунок використання кераміки PZT-4 майже в 3 рази вищий.

Порівняння результатів виконаного теоретичного аналізу дозволило якісно оцінити деякі переваги, які можна отримати за рахунок використання зарубіжної кераміки з більш високими характеристиками для всіх типів розглянутих п'єзокерамічних перетворювачів. Отримані при цьому висновки, доцільно використовувати при формулюванні технічних вимог до властивостей вітчизняної п'єзокераміки України.

Література

1. Аронов Б.С. Об энергетическом методе расчета пьезокерамических электроакустических преобразователей // Вопросы судостроения. Сер. Общетеchnическая. – 1978.- Вып. 31- с.48-59.
2. Подводные электроакустические преобразователи (Расчет и проектирование). Справочник / Под ред. чл.-корр. АН СССР В.В. Богородского.- Л.: Судостроение, 1983. -248 с.
3. Писаренко Г.Г. Прочность пьезокерамики .- К.: Наукова думка, 1987.- 170 с.
4. G.A. Brigham Analysis of the class IV Flextensional transducer by use of wave mechanics // J. Acoust. Soc. Amer.- 1974.- v.56, №1. – p. 31-39
5. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона.- т.1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Ч.А./ Пер. с англ. под ред. Л.Д. розенберга.- М.: “Мир”, 1966.- 592 с.
6. Гусакова Г.И. Некоторые характеристики преобразователя со связанными колебательными системами // Вопросы судостроения. Сер. Акустика.- 1974.- Вып.І.- с.63-69.
7. Римский – Корсаков А.В. и др. Акустические подводные низкочастотные излучатели. – Л.: Судостроение, 1984.- 182 с.
8. Кузьменко А.Г. Расчет характеристик продольно – изгибного преобразователя// Известия Ленинградск. эл.-техн. института им. В.И. Ленина – 1989.- Вып. 407.- с.87-89.
9. Лейко А.Г., Маяцкий В.И. Акустическое поле бесконечного эллиптического цилиндрического излучателя при смешанных граничных условиях// Акуст. ж.- 1971.- т.17, вып.3.- с.476-478.
10. Андебур В.А., Рубцов Ю.К. Импеданс излучения эллиптических цилиндрических излучателей со смешанными граничными условиями// Акуст. ж.- 1974.- т.20, вып.5.- с.668-672.
11. Андебур В.А., Силецкий С.М. Рассеяние звука эллиптическим цилиндром со смешанными граничными условиями// Акуст. ж.- 1973.- т.19, вып.6.- с.897-901.

12. Гловацкая Я.Г., Старов Л.С. Расчет поля излучения арочного преобразователя// Вопросы судостроения. Сер. Акустика.- 1976.- вып.7.- с. 70-80.
13. Brigham G.A. An equivalent circuit for oval flextensional transducer // J. Acoust. Soc. Amer.-1972.- v.51, №1 (pt.1).- p.22.
14. Brigham G.A. Present status in flextensional transducer technology // J. Acoust. Soc. Amer.-1980.- v.68, №4.- p. 1046-1052.
15. Пат. США №4 245681 от 4.07.1989.
Flextensional sonar transducer assembly.- G.Bronfield.
16. Catalog of underwater sound transducers.- Volta (California), ITC, 1976.
17. Каталог акустических преобразователей фирмы США.
Edo Western Corporation.
18. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики.- Л.: Энергоатомиздат., 1990.- 272 с.
19. Sherman C.H., Parke N.G. Acoustic radiation from a thin torus with application to the freq. – loading ring transducer// JASA, 1965.- v.38, №5.- p. 715-722.
20. Mahon G.W. Performance of Open ferroelectric ceramic cylinders in underwater transducers//JASA, 1964.- v.36, №3.- p. 528-533.
21. Sandman B.L. Fluid – loading influence coefficients for a finite cylindrical shell//JASA. 1976.- v.60, №6.- p. 1256 – 1264.
22. Шендеров Е.Л. Излучение звука при осесимметричных колебаниях коечной открытой трубы// Акуст. ж.- 1989.- т.35, вып.1.- с. 138-147.
23. Catalog of underwater sound transducers. Edo western corp., USA, Salt-Lake city,- 1970.
24. Римский-Корсаков А.В. и др. Акустические подводные низкочастотные излучатели.- Л.: Судостроение, 1984.- 182с.
25. Аронов Б.С., Скребнев Г.К. О влиянии условий закрепления пьезокерамических пластин на параметры, круглых пластинчатых электромеханических преобразователей// Акуст. ж.- 1983.- т.29, вып.2.- с. 152-156.

26. Вассергисер М.Е. и др. Расчет и исследование дисковых изгибных преобразователей на пассивной подложке в режимах приема и излучения.// Акуст. ж.- 1992.- т.38, вып.6- с. 1019-1024.
27. Справочник по расчету электроакустических преобразователей “Весна”. ЛУ Э. 538.281, ЦНИИ “Морфизприбор”, Л.- 1978.- 232 л.
28. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны.- Л.: Судостроение, 1988.- 198 с.
29. Орлов Л.В., Шабров А.А. Гидроакустическая аппаратура рыбопромыслового флота.- Л.: Судостроение, 1987.- 222 с.
30. Подводная акустика и обработка сигналов// Под. ред. Л.Бьёрнё/ Пер. под ред. Ю.Ю.Житковского/- М.: Мир,- 1985.- 184 с.
31. І.В. Аверичев, начальник науково-дослідницького відділу, О.Г. Лейко, доктор технічних наук, професор, Д.М. Кизима, магістр НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”, А.О. Святненко начальник науково-дослідницького відділу ДП “КНДІ Гідроприладів”. Властивості циліндричних гідроакустичних перетворювачів з внутрішніми податливими екранами. // Журнал ОВТ.- 2018.- вип.4.